

# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería de Telecomunicación

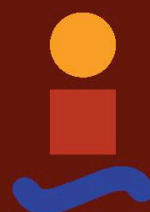
### Sistemas de Navegación Aérea en el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas

Autor: Lourdes Vaquera Valencia

Tutor: Rafael Boloix Tortosa

**Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería de Telecomunicación

# **Sistemas de Navegación Aérea en el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas**

Autor:  
Lourdes Vaquera Valencia

Tutor:  
Rafael Boloix Tortosa  
Profesor contratado doctor

Dep. de Teoría de la Señal y Comunicaciones  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2017





Trabajo Fin de Máster: Sistemas de Navegación Aérea en el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas

Autor: Lourdes Vaquera Valencia

Tutor: Rafael Boloix Tortosa

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mi hermano*

*A mi novio*



# Agradecimientos

---

Con este proyecto pongo punto y final a una etapa que termina después de 6 años. Finalizo mi etapa universitaria con la alegría de saber que por fin he conseguido mi sueño: soy Ingeniera Superior de Telecomunicaciones. Pero esto no hubiera sido posible conseguirlo sin la ayuda y el apoyo de muchas de las personas que han estado junto a mí durante este periodo, y sobre todo en estos dos últimos años de Máster. No ha sido un camino fácil, lo que hace que la satisfacción al llegar a la meta sea mucho mayor.

Como no podía ser de otra manera, me gustaría comenzar dando las gracias a mis padres. Siempre me habéis dicho que *“Todo esfuerzo tiene su recompensa”*. Pues sí, al final tengo que reconocer que es cierto. Después de todos estos años de esfuerzos tanto por mi parte como por la vuestra, lo hemos conseguido. Y si, hablo en plural porque considero que este logro es tanto mío como vuestro. Papá y mamá gracias por haberme apoyado en todo momento y por haberme proporcionado todos los medios posibles para que yo haya podido llegar hasta aquí. Javier, mi querido hermano (y mi actual compi de piso) gracias a ti también por haber estado a mi lado siempre.

José Antonio no hace ni un año desde que llegaste a mi vida, pero en estos meses te has convertido en una de las personas más importante de ella. Gracias por apoyarme y transmitirme ese positivismo que te caracteriza y que tanta falta me ha hecho en esos momentos de exámenes. No puedo olvidarme de todas esas noches en la que yo te decía *“que mal llevo el examen”* y tu respuesta siempre era *“tranquila, si vas a aprobar”*. Finalmente cuando me daban la nota siempre venía tu *“te lo dije”*. Espero que sigamos compartiendo nuestra vida juntos. Al darte las gracias a ti, no puedo olvidarme de José Carlos y Jesús, que desde el primer día me habéis acogido como una prima más y que os habéis convertido en mis angelitos de la guarda cada vez que vuestro primo estaba en la otra punta del mundo. Nos quedan muy buenos ratos por compartir todos juntos.

Antonio, ¿recuerdas cuando nos conocimos? Si, fue hace 6 años en el Colegio Mayor Maese Rodrigo (Mairena del Aljarafe). Tú llegaste con tu sueño de ser médico y yo con el mío de ser ingeniera de telecomunicaciones y finalmente lo hemos conseguido. Dr. Moreno Loro, gracias por haber estado a mi lado durante 6 años. Tiempo en el que hemos compartido muchos momentos y muy variados, lo mismo nos hemos pasado la tarde super agobiados estudiando que la hemos echado paseando por Sevilla conociendo sus maravillosos rincones. Aunque ahora nuestras vidas hayan cambiado y cada uno tenga su carrera profesional, espero que sigamos compartiendo esos buenos momentos juntos.

A vosotros, mis amigos incondicionales: Juan Antonio, María y Pastora. Gracias por aguantarme (que sé que no es fácil). Me habéis escuchado cuando necesitaba desahogarme, me habéis animado cuando estaba triste y habéis celebrado conmigo mis momentos felices. ¿Qué más puedo pedir? Pues una cosa, seguir teniendo vuestra amistad como hasta ahora.

También quería agradecer a la plantilla de Wellness Telecom su gran acogida. Desde el primer día que comencé a trabajar allí en Diciembre del pasado año me habéis tratado genial y me habéis enseñado muchísimas cosas. No sólo sois mis compañeros de trabajo, yo os considero también mis amigos. Y no puedo dejar de mencionar a mi departamento, el departamento de Preventa (José, Carolina, María y Antonio), gracias por la paciencia que teneis conmigo y por transmitirme vuestros conocimientos.

Sois muchos más los que me habéis acompañado en esta andadura y no me gustaría olvidarme de nadie. A lo largo de este breve texto he mencionando a las personas más cercanas en estos dos últimos años, pero hay muchas otras que gracias a su granito de arena también han ayudado que yo haya llegado hasta aquí. GRACIAS A TODOS.

*Lourdes Vaquera Valencia*

*Graduada en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación*

*Sevilla, 2017*

# Resumen

---

Con el paso de los años, se ha producido una gran evolución de los medios de transporte. Desde el primer momento de su existencia, el hombre se mueve, anda, se desplaza y quiere ir cada vez más lejos. Esto le lleva a inventar medios que le permitan trasladarse de un lugar a otro de forma más rápida, cómoda y segura.

Uno de los avances más significativos para el ser humano en este aspecto, ha sido alcanzar el sueño de volar. Gracias a la invención del avión a principios del siglo XX, las personas pueden recorrer cientos de kilómetros surcando el cielo y llegar al lugar deseado en un tiempo impensable hace algunos siglos.

A medida que han pasado los años, los aviones han ido mejorando y se han desarrollado sistemas que permiten mejorar la calidad y seguridad de los vuelos.

Gracias a los sistemas de navegación aérea podemos conocer la posición exacta de una aeronave en un momento determinado de su trayectoria y aterrizar evitando cualquier tipo de complicaciones.

El objetivo del presente trabajo es dar a conocer los sistemas de navegación aérea utilizados en la actualidad, centrándonos en los sistemas del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, el aeropuerto de la capital de España.





# Abstract

---

Over the years, there has been a great evolution of means of conveyance. From the first moment of his existence, the man moves, walks, gets around and wants going further and further. This encourages to invent means that allow people to move from one place to another in a faster, comfortable and safe way.

One of the most significant advances for the human in this aspect has been to achieve the dream of flying. Thanks to the invention of the airplane in the early twentieth century, people can travel hundreds of kilometres through the sky and reach the desired place in a time that was unthinkable few centuries ago.

As the years have passed, planes have been improving and systems have been developed to improve flight quality and safety.

Thanks to air navigation systems, we can know the exact position of an aircraft at a certain point in its path and land, avoiding any kind of complications.

The objective of this project is to present the air navigation systems used today, focusing on the Adolfo Suárez Madrid-Barajas airport systems, the airport of the Spanish capital.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>Notación Y Glosario</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivos del proyecto</i>	2
1.2 <i>Contenido de la memoria</i>	2
<b>2 El aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Características Técnicas del Aeropuerto</i>	7
2.1.1 <i>Características operativas</i>	7
2.1.2 <i>Aeródromo</i>	7
2.1.3 <i>Navegación Aérea</i>	8
<b>3 Sistema de aterrizaje instrumental (ILS)</b>	<b>9</b>
3.1 <i>Categorías de ILS</i>	9
3.2 <i>Componentes del Sistema ILS</i>	10
3.3 <i>Funcionamiento de ILS</i>	13
3.4 <i>Futuro de ILS</i>	15
3.5 <i>El Sistema ILS en el Aeropuerto Madrid-Barajas</i>	15
3.5.1 <i>Introducción a ICS Telecom</i>	16
3.5.2 <i>Simulaciones en el Aeropuerto Madrid Barajas</i>	18
<b>4 Sistema VOR</b>	<b>25</b>
4.1 <i>Tipos de estaciones de tierra VOR</i>	27
4.2 <i>Análisis de un sistema VOR desde el punto de vista radio</i>	27
4.3 <i>Precisión de VOR</i>	28
4.4 <i>VOR Doppler</i>	29
4.5 <i>Futuro del Sistema VOR</i>	30
4.6 <i>El Sistema VOR del Aeropuerto Madrid-Barajas</i>	30
<b>5 Interferencias en los sistemas de navegación</b>	<b>35</b>

5.1	<i>Tipos de interferencia</i>	35
5.2	<i>Parámetros de evaluación de la compatibilidad</i>	36
5.2.1	Características de los sistemas aeronáuticos	36
5.2.2	Características de las estaciones de radiodifusión con modulación de frecuencia	38
5.2.3	Potencia de entrada en el receptor	40
5.3	<i>Criterios de evaluación de la compatibilidad</i>	41
5.3.1	Umbrales de interferencia normalizados	41
5.4	<i>Estudio de interferencias en el Aeropuerto Madrid-Barajas</i>	42
5.4.1	Interferencias del Sistema ILS	43
5.4.2	Interferencias del Sistema VOR	47
<b>6</b>	<b>Cobertura Radar</b>	<b>53</b>
6.1	<i>Clasificación de los sistemas Radar</i>	53
6.1.1	Según el número de antenas	53
6.1.2	Según el blanco	53
6.1.3	Según la forma de onda	53
6.1.4	Según su finalidad	54
6.1.5	Según su frecuencia de trabajo	54
6.1.6	Según su ámbito de aplicación	55
6.1.7	Otras tecnologías	55
6.2	<i>Principios de funcionamiento</i>	56
6.2.1	Reflexión	56
6.2.2	Ecuación Radar	56
6.2.3	Polarización	57
6.2.4	Centelleo	57
6.2.5	Interferencias	57
6.2.6	Ruido	58
6.2.7	Clutter	58
6.2.8	Jamming	59
6.3	<i>Procesado de una señal en un Sistema Radar</i>	59
6.3.1	Tiempo de tránsito	59
6.3.2	Modulación en frecuencia	60
6.4	<i>Cobertura Radar en el aeropuerto Madrid-Barajas</i>	61
6.4.1	Estudios teóricos	61
6.4.2	Simulaciones para el cálculo de cobertura radar	63
6.4.3	Interferencias radar	68
<b>7</b>	<b>Red SMR</b>	<b>73</b>
7.1	<i>El Sistema SMR del aeropuerto Madrid-Barajas</i>	74
<b>8</b>	<b>Simulación MLAT</b>	<b>79</b>
8.1	<i>Métodos de MLAT</i>	79
8.1.1	TDOA o Diferencia de los tiempos de llegada	79
8.1.2	TSOA o Suma de tiempos de llegada	83
8.2	<i>Aplicaciones de MLAT</i>	84
8.3	<i>Requisitos para una red MLAT</i>	85
8.3.1	MSS-A	85
8.3.2	MSS-W	85
8.4	<i>Sistema MLAT en el aeropuerto de Madrid-Barajas</i>	85
8.4.1	MSS-A	86
8.4.2	Predicción del acceso a MSS-A	92
<b>9</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>95</b>
	<b>Referencias</b>	<b>97</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2–1. Características de las pistas del Aeropuerto Madrid-Barajas	7
Tabla 3–1. Categorías de ILS	10
Tabla 4–1. Frecuencias de los VOR	31
Tabla 5–1. Supresión de emisiones no esenciales	39
Tabla 5–2. Características de la estaciones FM	42
Tabla 6–1. Bandas de frecuencia	54
Tabla 6–2. Asignación de frecuencias	64
Tabla 6–3. Parámetros para calcular el rango radar	65
Tabla 6–4. Asignación de frecuencias	70
Tabla 7–1. Características de los radares de superficie del aeropuerto de Madrid	74
Tabla 8–1. Distribución normal	92
Tabla 8–2. Leyenda de la figura 8-14	93



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Primer vuelo de los hermanos Wright	1
Figura 1-2. Avión utilizado en la actualidad. Airbus A380	2
Figura 2-1. Superficie ocupada por el Aeropuerto Madrid-Barajas	5
Figura 2-2. Pistas del Aeropuerto de Madrid-Barajas	6
Figura 2-3. Terminales del Aeropuerto de Madrid-Barajas	8
Figura 3-1. Patrón de modulación del localizador	11
Figura 3-2. Emplazamiento de la senda de planeo	11
Figura 3-3. Localizador	12
Figura 3-4. Radiobalizas del sistema ILS	13
Figura 3-5. Instalación típica de un sistema ILS.	13
Figura 3-6. Esquema de funcionamiento del sistema ILS	14
Figura 3-7. Sistema ILS en la cabina de un avión	15
Figura 3-8. De arriba abajo y de izquierda a derecha: Pista 18R, Pista 18L, Pista 32L y Pista 32R	16
Figura 3-9. Pantalla Inicial de ICS Telecom	17
Figura 3-10. Interfaz gráfica de ICS Telecom	18
Figura 3-11. Localizadores situados en los correspondientes emplazamientos	19
Figura 3-12. Localizadores situados en los correspondientes emplazamientos	20
Figura 3-13. Análisis de cobertura de los localizadores ILS	21
Figura 3-14. Análisis de cobertura de los localizadores ILS (II)	21
Figura 3-15. Análisis de mejor servidor de los localizadores ILS	22
Figura 3-16. Análisis solapamiento de servidor de los localizadores ILS	23
Figura 3-17. Perfil de trayectoria desde el localizador situado en la pista 18L	24
Figura 3-18. Perfil de trayectoria desde el localizador situado en la pista 18L	24
Figura 4-1. Estación VOR en Tierra	25
Figura 4-2. Rutas o calles de un sistema VOR	26
Figura 4-3. Indicador VOR en el panel de un avión	26

Figura 4-4. Patrón de Radiación de VOR	28
Figura 4-5. Antena DVOR	29
Figura 4-6. Emplazamientos de los VOR que dan servicio al aeropuerto de Madrid	31
Figura 4-7. Configuración de los parámetros de las antenas VOR	32
Figura 4-8. Análisis de cobertura VOR de las antenas cercanas al aeropuerto de Madrid – Barajas	32
Figura 4-9. Detalle del análisis de cobertura VOR en el aeropuerto de Madrid	33
Figura 5-1. DOC frontal típica de un localizador ILS	37
Figura 5-2. Relación en la distancia/altura de la cobertura del VOR en función de la p.r.a.	38
Figura 5-3. Regiones definidas por la ITU-R	39
Figura 5-4. Conversión de la intensidad de campo mínima del localizador ILS en un nivel de señal a la entrada de un receptor aeronáutico.	41
Figura 5-5. Patrón de radiación de las antenas emisoras de radio FM	43
Figura 5-6. Emplazamientos de los localizadores ILS y de las antenas emisoras de radio FM	43
Figura 5-7. Estudio de cobertura de las antenas de radio FM para una potencia de transmisión del orden de KW	44
Figura 5-8. Estudio de cobertura de las antenas de radio FM	45
Figura 5-9. Estudio de cobertura de las antenas de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 10 KW	45
Figura 5-10. Estudio de cobertura de las antenas de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 100 KW	46
Figura 5-11. Estudio de cobertura de las antenas de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 1 MW	47
Figura 5-12. Emplazamientos de las antenas VOR y de las antenas emisoras de radio FM	48
Figura 5-13. Estudio de cobertura de las antenas emisoras de radio FM para una potencia de transmisión del orden de KW	48
Figura 5-14. Estudio de cobertura de las antenas emisoras de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 10 KW	49
Figura 5-15. Estudio de cobertura de las antenas emisoras de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 100 KW	50
Figura 5-16. Estudio de cobertura de las antenas emisoras de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 1 MW	50
Figura 5-17. Informe de interferencias para el VOR BRA	51
Figura 6-1. Reflector de esquina	56
Figura 6-2. El multitrayecto de la señal hace que el radar detecte blancos falsos	59
Figura 6-3. Área seleccionada mediante la herramienta ICS para realizar la simulación de cobertura radar	61
Figura 6-4. Simulación de detección radar de blancos a 1.000m de altura	62
Figura 6-5. Simulación de detección radar de blancos a 500m de altura	62
Figura 6-6. Filtrado de mapa porcentual	63
Figura 6-7. Emplazamientos elegidos para colocar los radares	63
Figura 6-8. Configuración de los parámetros de las antenas radar	64
Figura 6-9. Patrón de R0	66



Figura 6-10. Patrón de radiación de los radares	66
Figura 6-11. Estudio de cobertura radar.	67
Figura 6-12. Estudio de cobertura radar en detalle	67
Figura 6-13. Estudio de cobertura radar compuesta	68
Figura 6-14. Configuración de parámetros para calcular la interferencia radar	69
Figura 6-15. Configuración de la máscara IRF	69
Figura 6-16. Informe de interferencia radar con $IRF = 0$	70
Figura 6-17. Informe de interferencia radar con $IRF = 0$	71
Figura 6-18. Informe de interferencia radar con $IRF = 70$	71
Figura 6-19. Mapa de detección radar sin interferencias	72
Figura 6-20. Mapa de detección radar con interferencias	72
Figura 7-1. Visualización de un sistema SMR en el aeropuerto de Schiphol (Amsterdam)	74
Figura 7-2. Emplazamiento de los radares SMR en el aeropuerto de Madrid	75
Figura 7-3. Parámetros de los SMR del aeropuerto de Madrid	75
Figura 7-4. Estudio de cobertura de los sistemas SMR del aeropuerto de Madrid detectando blancos a 1 m de altura	76
Figura 7-5. Estudio de cobertura de los sistemas SMR del aeropuerto de Madrid	77
Figura 7-6. Estudio de cobertura de los sistemas SMR del aeropuerto de Madrid	77
Figura 8-1. Cálculo de TDOA	80
Figura 8-2. Cálculo de TDOA a partir del TOA	82
Figura 8-3. Cálculo de TSOA	83
Figura 8-4. Emplazamientos de los sensores e interrogadores del sistema MSS-A	86
Figura 8-5. Emplazamientos de los sensores e interrogadores del sistema MSS-A	87
Figura 8-6. Configuración de los parámetros de los sensores MLAT	87
Figura 8-7. Configuración de los parámetros de los interrogadores MLAT	88
Figura 8-8. Análisis de cobertura del sistema MSS-A	89
Figura 8-9. Detalle del análisis de cobertura del sistema MSS-A	89
Figura 8-10. Análisis del número de sensores que podrían conectarse en cada punto del mapa a un transpondedor situado en una aeronave	90
Figura 8-11. Filtrado para conocer a cuántos sensores se conectaría un transpondedor situado en una aeronave	91
Figura 8-12. Detalle del filtrado para conocer a cuántos sensores se conectaría un transpondedor situado en una aeronave	91
Figura 8-13. Informe resumen sobre el sistema MLAT del aeropuerto de Madrid	92
Figura 8-14. Cálculos de precisión de MLAT TDOA-H	93



# Notación Y Glosario

---

°	Grado
>	Mayor que
≥	Mayor o igual que
A-SMGCS	Advanced Surface Movement Guidance and Control System
ACC	Adaptative Cruise Control
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast
AGL	Above Ground Level
AM	Amplitude Modulation
APU	Auxiliar Power Unit
ARINC	Aeronautical Radio, Incorporated
ASDE	Airport Surface Detection Equipment
ATC	Air Traffic Control
CDI	Course Desviation Indicator
Hz	Hertzio
CDI	Course Desviation Indicator
CFAR	Constant False-Alarm Rate
CLR	Señal Clearance
cm	Centímetro
CR-4	Con cuota de ruido de nivel 4
CSB	Carrier Side Band o Portadora de Bandas Laterales
CVOR	Conventional VOR
CW	Continuous Wave
CW-FM	Continuous Wave – Frecuency Modulation u Onda continua
CW-PM	Continuous Wave – Phase Modulation u Onda continua
dB	decibelio
dBm	decibelio miliwatio
dBW	decibelio watio
DDM	Difference in the Depth of Modulation
DME	Distance Measuring Equipment
DOC	Designed Operational Coverage

DOC	Designed Operational Coverage
DVOR	Doppler VOR
EHF	Extra High Frequency
ESM	Electronic Support Measurement
FAA	Fleet Air Arm
FM	Frequency Modulation
GHz	GigaHertzio
GP	Glide Path ó Senda de Planeo
GPS	Global Positioning System
GS	Glide Slope ó Senda de Planeo
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HF	High Frequency
HSI	Horizontal Situation Indicator
ILS	Instrumental Landing System
IM	Inner Marker
ITU	International Telecommunications Union
ITU-R	International Telecommunications Union - Radiocomunications
JAA	Joint Aviation Authorities
KHz	KiloHertzio
Km	Kilómetro
Km/h	Kilómetros por hora
LAAS	Local Area Augmentation System
log	Logaritmo en base 10
LOM	Locator Outer Marker
LOP	Line Of Position
LOS	Line of Sight
LVP	Low Visibility Procedures
m	metros
máx	máximo
MF	Medium Frequency
MHz	MegaHertzio
MLAT	Multilateration o Multilateración
MM	Middle Marker
mm	Milímetro
MSS	Multilateration Surveillance System
MSS – W/WAN	Multilateration Surveillance System – Wireless/Wide Area Network
MSS-A	Multilateration Surveillance System – Airport
MW	MegaWation
NBD	Non Directional Beacon
nM	Nautical Mille
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OBI	OmniBearing Indicator
OBS	OmniBearing Selector
OM	Out Marker
OTH	Over The Horizon
p.r.a	Potencia radiada aparente

PAPI	Precision Approach Path Indicator
PPI	Plan Position Indicator
rad/s	Radianes por segundo
RADAR	Radio Detectig And Ranging
RCS	Radar Cross-Section
RF	Radio Frecuencia
RNAV	Random NAVigation
rps	Revoluciones Por Segundo
s	segundo
SAR	Servicio Aéreo de Rescate
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBO	Side Band Only
SHF	Super High Frecuency
SMR	Surface Movement Radar
SNR	Signal Noise Ratio
SSR	Secondary Surveillance Radar
TDOA	Time Diference Of Arrivals
TMA	Terminal Maneuvering Area
TOA	Time Of Arrival
TSOA	Time Sum Of Arrivals
UHF	Ultra High Frecuency
VDOP	Vertical Dilution of precision
VHF	Very High Frecuency
VMC	Visual Meteorologic Conditions
VOR	VHF Omnidirectional Range
W	watio
WAAS	Wide Area Augmentation System
$\mu A$	micro amperio
$\mu V$	microvoltio



# 1 INTRODUCCIÓN

---

El sueño de volar se remonta a la prehistoria. Pero no fue hasta el siglo XIX cuando comenzaría el desarrollo del avión. [1]

Después de innumerables intentos fracasado y luego de años de investigaciones por los primeros precursores de la aviación como John J. Montgomery, Otto Lilienthal, Percy Pilcher y Octave Chanute llega en 1.890 la creación del primer avión propiamente dicho por Clément Ader llamado “Eolé” que voló a una altura de 20 cm y recorrió una distancia de 50 metros.

El alemán Otto Lilienthal realizó sus experimentos con cometas y ornitópteros pero los mayores éxitos los obtuvo con sus vuelos en planeador entre 1.894 y 1.896. Por desgracia, murió en 1.896 al perder el control de su aparato y estrellarse contra el suelo desde 20 metros de altura.

Los numerosos experimentos realizados con cometas durante esta época, consiguieron mejorar de forma notable los conocimientos sobre aerodinámica y estabilidad del vuelo.

Los logros conseguidos durante el siglo XIX aportaron los fundamentos necesarios para el éxito de los hermanos Wright, pero los mayores avances se debieron a los esfuerzos de Chanute, Lilienthal y Langley a partir de 1.885.

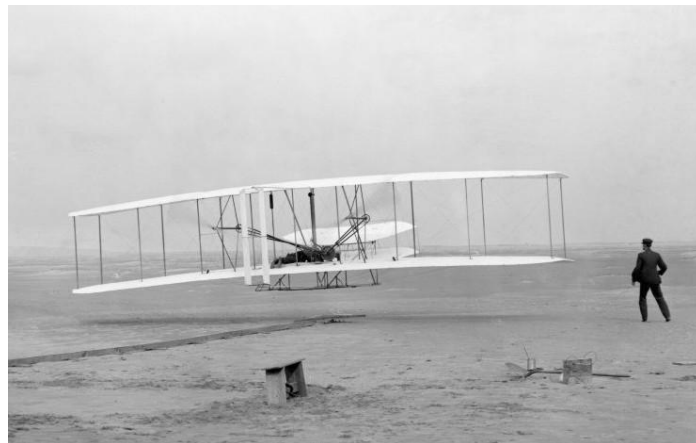


Figura 1-1. Primer vuelo de los hermanos Wright

En 1.903 aún no se habían conseguido la estabilidad y el control necesarios para un vuelo prolongado, pero los conocimientos aerodinámicos y sobre todo el éxito de los motores de gasolina, que sustituyeron a los más pesados de vapor, permitirían que la aviación evolucionase con rapidez.

Irónicamente, las dos guerras mundiales fueron un factor fundamental para el desarrollo de la aviación y llevarla a lo que es hoy en día.

Durante la Primera Guerra Mundial se utilizaron aeroplanos y aeronaves ligeras para reconocimiento, ataque y bombardeo. Durante los cuatro años que duró el conflicto bélico se construyeron más aviones y se entrenaron más pilotos que en los 13 años que pasaron desde el primer vuelo.

Ya entre 1.930 y 1.940 crecieron rápidamente los vuelos transoceánicos y de pasajeros.

En la Segunda Guerra Mundial la importancia de la aviación fue preponderante para los objetivos bélicos, lo que derivó en un avance en el desarrollo de las tecnologías y un crecimiento del número de aviones fabricados. Terminada la guerra la producción de aviones militares se redujo drásticamente, creciendo los pedidos de aviones civiles.

Desde ahí los avances se sucedieron uno tras otro, llegando a la realidad que vivimos hoy en día. En la figura 1-2 se muestra el modelo A380 de Airbus, unos de los aviones comerciales con mayor número de plazas utilizados actualmente (puede transportar a 800 personas). [2]



Figura 1-2. Avión utilizado en la actualidad. Airbus A380

## 1.1 Objetivos del proyecto

El objetivo principal del Proyecto es dar a conocer los diferentes sistemas de navegación utilizados en la actualidad en los diversos aeropuertos del mundo. Para ello, a lo largo de cada uno de capítulos de este documento se van a ir explicando las características y modos de funcionamiento de cada uno de ellos.

Además de todo el contenido teórico, el proyecto consta de una parte práctica en la cual se simularán cada uno de los sistemas utilizando una herramienta específica para ello llamada ICS Telecom. Se ha decidido utilizar este software debido a su gran potencial y a la amplia posibilidad de funcionalidades que ofrece.

Debido a que el aeropuerto de Madrid es uno de los más grandes e importantes del mundo, nos vamos a basar en él para la realización de las diferentes simulaciones y estudios de cobertura de los sistemas de navegación. En él están implementados todos los sistemas de navegación aérea explicados en este documento.

## 1.2 Contenido de la memoria

Este documento consta de 9 capítulos. El primero de ellos es la Introducción, en la cual nos encontramos, y en la que hemos explicado en qué va a consistir el proyecto y cuáles son sus objetivos principales.

En el segundo capítulo se detallan las características principales del aeropuerto en el cual nos vamos a centrar lo largo de dicho proyecto.

A partir del capítulo 3 se van a ir describiendo uno por uno los distintos sistemas de navegación utilizados en la actualidad. Desde este capítulo hasta el octavo van a tener la misma estructura: en los primeros apartados del capítulo se describirán las características y modo de funcionamiento del sistema de navegación que vaya tocando y el capítulo finalizará con los resultados obtenidos tras la realización de varias simulaciones en el aeropuerto de Barajas utilizando la herramienta ICS Telecom.

En el capítulo 3 desarrollamos ILS, el principal de sistema utilizado en los aeropuertos para facilitar el



aterrizaje a los aviones.

Para ayudar a las aeronaves a seguir la ruta correcta existe un sistema denominado VOR. Este sistema se explica en el cuarto capítulo.

Tanto el sistema VOR como el ILS utilizan frecuencias similares a las usadas para la transmisión de radios FM. Esto puede provocar que haya ciertas interferencias entre los sistemas mencionados. Por ello, en el capítulo 5 se describen los distintos tipos de interferencias que puede haber basándonos en la norma ITU-R SM 1009.

El análisis del sistema Radar se expone a lo largo del capítulo 6.

SMR es un tipo específico de radar utilizado para conocer la posición de las aeronaves cuando se encuentran en la superficie del aeropuerto. En el séptimo capítulo se describe este sistema.

En el capítulo 8, hallamos la explicación sobre otro sistema de posicionamiento. En este caso se trata del sistema MLAT.

Para finalizar el documento exponemos las conclusiones extraídas tras la elaboración del mismo. Estas conclusiones se muestran en el capítulo 9.



## 2 EL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS

El aeropuerto de Madrid-Barajas (código IATA (International Air Transport Association): MAD, código OACI<sup>1</sup> (Organización de Aviación Civil Internacional): LEMD), está situado en el noroeste de Madrid, distrito de Barajas. Sus coordenadas son las siguientes: 40°28'20"N 3°33'39"O. Las terminales se localizan en el término municipal de Madrid, pero el campo de vuelos se extiende también por Alcobendas, San Sebastián de los Reyes y Paracuellos del Jarama tal y como podemos comprobar en la figura 2-1. [3] [4]

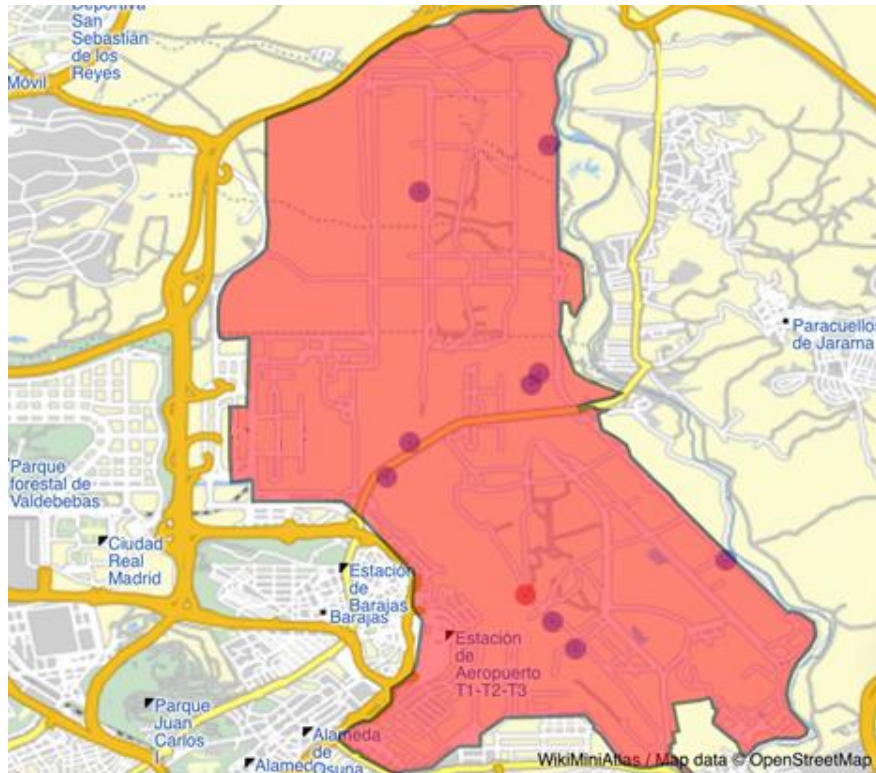


Figura 2-1. Superficie ocupada por el Aeropuerto Madrid-Barajas

Es el primer aeropuerto español por tráfico de pasajeros, carga aérea y número de operaciones.

Dispone de cuatro terminales de pasajeros, una terminal ejecutiva, un centro de carga aérea y dos zonas principales de hangares: una en la Antigua Área Industrial (entre la T3 y la T4) y otra en el Área Industrial de La Muñoza.

Este aeropuerto cuenta con cuatro pistas físicas paralelas dos a dos: las 18L/36R – 18R/36L y las 14L/32R – 14R/32L. Además, cuenta también con una quinta pista, la primera en construirse, que se usa sólo como pista

<sup>1</sup> El OACI es también denominado por sus siglas en inglés ICAO (International Civil Aviation Organization)

de estacionamiento. La figura 2-2 muestra la distribución de dichas pistas.



Figura 2-2. Pistas del Aeropuerto de Madrid-Barajas

En terminología aeronáutica se considera que tiene 8 pistas diferentes, y que solo se usan simultáneamente cuatro de ellas según las configuraciones de operación, norte o sur. El Control de Tráfico Aéreo o ATC (Air Traffic Control) elige una u otra configuración en función de la meteorología. [5]

- Configuración norte: durante el día (7:00-23:00), las pistas 36L y 36R se utilizarán para despegues y las pistas 32L y 32R para aterrizajes. Durante la noche (23:00-7:00) se utilizará la pista 36L para despegues y la 32R para aterrizajes. No se autorizan despegues por las pistas 14L y 14R.
- Configuración sur: durante el día las pistas 14L y 14R se utilizarán para despegues y las pistas 18L y 18R para aterrizajes. Durante la noche se utilizará la pista 14L para despegues y la 18L para aterrizajes. No se autorizarán despegues por las pistas 32L y 32R.
- Además existe una pista más: la 18C/36C, (antes 18-36 y 18L-36L) que fue la primera que poseyó el aeropuerto. Se usa como pista de estacionamiento y discurre entre la Terminal T4-S y la Terminal 1. La pista está cortada a la altura de su cruce con la pista 14R/32L y cerca de su extremo norte es cruzada por una carretera de vehículos del aeropuerto, lo que impide que ahora mismo se puedan realizar operaciones de despegue y aterrizaje. Se encuentra sin uso desde la inauguración de las pistas 18R/32L y 14L/32R, a mediados de la década de 2.000.

En la tabla 2-1 se muestran la longitud y el material con el que están fabricadas las superficies de las pistas del aeropuerto de Madrid.

Tabla 2–1. Características de las pistas del Aeropuerto Madrid-Barajas

Dirección	Largo		Superficie
	metros	pies	
18R/36L	4.179x60	14.272x197	Asfalto
18L/36R	3.500x60	11.483x197	Asfalto
14L/32R	3.500x60	11.483x197	Asfalto
14R/32L	4.100x60	13.451x197	Asfalto

## 2.1 Características Técnicas del Aeropuerto

En los siguientes subapartados vamos a exponer algunas de las características más importantes del aeropuerto.

### 2.1.1 Características operativas

El aeropuerto de Madrid-Barajas es un aeropuerto H24. A pesar de ello, las operaciones en él sufren algunas restricciones. Está prohibido su uso por aeronaves sin radiocomunicación y helicópteros. Además se prohíbe la operación de despegue y aterrizaje de aeronaves clasificadas a partir de una cuota de ruido de nivel 4 ó CR-4. A su vez existen restricciones parciales para otras aeronaves entre las 23:00 y las 7:00.

Algunas aeronaves tienen restricciones nocturnas en el uso de las Unidades de Auxiliares de Potencia o APU (Auxiliar Power Unit): Ilyushin (todos los modelos), DC-8 (todos los modelos), Fokker 50, McDonnell Douglas MD-80 (todos los modelos), MD-11, Boeing 747 (todos los modelos), Bombardier CRJ200, Embraer 120, Boeing 717 y Boeing 727. Las siguientes tienen además restricciones en los procedimientos de salida: Antonov 72, Antonov 124, Airbus A340-600, Boeing 727, Boeing 737-100, Boeing 737-200, Boeing 747, Douglas DC-8, McDonnell Douglas DC-10, Ilyushin 62, Lockheed L-1011, McDonnell Douglas MD-11, Tupolev 134, British Aerospace BAe 125, North American Sabreliner y Yakovlev Yak-42.

### 2.1.2 Aeródromo

El aeropuerto de Barajas consta de tres edificios, un edificio satélite y dos diques (uno de los cuales puede considerarse una terminal), además de una terminal dedicada exclusivamente a carga. La división espacial utilizada en la nomenclatura del aeropuerto (T1, T2, T3, T4 y T4-S) no coincide exactamente con la división real arquitectónica del aeropuerto. Además y desde inicios del 2.013 cuenta con una terminal de Aviación Ejecutiva.

Barajas cuenta con dos zonas principales de hangares, por un lado, la Antigua Área Industrial, y por otro lado el Área Industrial de La Muñoza.

En la figura 2-3, podemos ver la situación geográfica de las terminales en el interior del aeropuerto.



Figura 2-3. Terminales del Aeropuerto de Madrid-Barajas

### 2.1.3 Navegación Aérea

El aeropuerto cuenta con tres torres de control. Cualquiera de las tres torres tiene capacidad para controlar cualquier aspecto del tráfico aéreo y el movimiento de aeronaves en el aeropuerto, pero en condiciones de funcionamiento normal las tareas están repartidas entre las tres.

- La torre Norte, situada junto al edificio satélite. Es la torre de control principal del aeropuerto y la más grande de todas.
- La torre Oeste, emplazada junto al edificio terminal T4. Es la última torre de control en construirse en el aeropuerto. Se inauguró en 2.006 a la par que la Terminal T4. Se encarga de gestionar el movimiento de rodadura de las aeronaves en tierra en torno a la terminal T4.
- La torre Sur, situada dentro del edificio terminal T2. Es la antigua torre de control del aeropuerto. Cuando fue construida estaba emplazada en la Terminal Nacional. Hasta 1.998 era la única torre de control del aeropuerto, pero desde ese momento sólo gestiona las operaciones de rodadura de las aeronaves en torno a los edificios terminal T1, T2 y T3, así como el terminal de carga. A pesar de esta reducción de funciones la torre sigue contando con capacidades plenas.

El aeropuerto cuenta con diferentes ayudas a la navegación. Gracias a estos sistemas, es posible la navegación aérea en las inmediaciones del aeropuerto.

En cuanto a ayudas para el aterrizaje, el aeropuerto cuenta con varios sistemas de aterrizaje instrumental de Categoría III, Indicador de Trayectoria de Aproximación de Precisión y de Sistemas de Iluminación de Aproximación de Precisión CAT II/III (900m) en las pistas 32L, 32R, 18L y 18R.

El aeropuerto Madrid-Barajas también cuenta con cuatro VOR (VHF Omnidirectional Range). Este sistema es utilizado por las aeronaves para seguir una ruta preestablecida durante su vuelo. Todos ellos están asociados a un Equipo Telemétrico o DME (Distance Measuring Equipment). Dos de ellos en las cercanías del aeropuerto (gestionados directamente por el aeropuerto) y otros dos en el entorno de Madrid, gestionados por la Dirección de Navegación Aérea de la Región Centro.

El aeropuerto cuenta además con dos radares de Superficie (SMR), que vigilan los movimientos de las aeronaves así como de cualquier vehículo en el área de maniobras. Están situados en el campo de antenas de la torre Norte (junto a la T4 Satélite) y en el de la torre Sur (junto a la T2).

También cuenta, desde marzo del 2.011, con un sistema de mutilateración capaz de detectar blancos cooperativos (dotados de transponder en el área de maniobras).

# 3 SISTEMA DE ATERRIZAJE INSTRUMENTAL (ILS)

---

**T**ranscurridos pocos años desde el primer vuelo realizado por los hermanos Wright en diciembre de 1.903, y con los primeros pasos de la aviación comercial, empezó a sentirse la necesidad de disponer de sistemas que permitiesen volar en condiciones meteorológicas adversas y de esta forma aprovechar la ventaja de velocidad que tenían los aviones. En un avión, el aterrizaje es una operación de precisión, en ocasiones irreversible, que se realiza entre 300 y 400 Km/h y perdiendo altura continuamente. De ahí la necesidad de disponer de un procedimiento y unas ayudas visuales e instrumentales que garanticen total seguridad.

El sistema de aterrizaje instrumental es el sistema que ayuda a la aproximación y el aterrizaje establecido por OACI como sistema normalizado en todo el mundo. Este sistema de control permite que un avión sea guiado con precisión durante la aproximación a la pista de aterrizaje y, en algunos casos, a lo largo de la misma proporcionando latitud, longitud y radial de posición. El ILS se compone del equipo en tierra que emite las señales, y del equipo a bordo del avión que las procesa y las muestra al piloto en un instrumento para poder navegar. [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17]

## 3.1 Categorías de ILS

El mismo ILS tiene diferentes categorías dependiendo de los requisitos de visibilidad y de techo de nubes. Cuanto menor es el requisito meteorológico (techo de nubes más bajo o menor visibilidad) mayor precisión se necesita y se le nombra con una mayor categoría. Las categorías se dividen en CAT I, II y III. Dentro de la categoría III encontramos tres subdivisiones A, B, y C, siendo esta última la de mayor precisión ya que permite aterrizar con 0 metros de visibilidad y con el techo de nubes pegado al suelo.

Tanto OACI, JAA (Joint Aviation Authorities) y la FAA (Federal Aviation Administration) emitieron unos requisitos en cuanto a techo de nubes y visibilidad para cada categoría de ILS no siendo exactamente los mismos pero sí muy parecidos.

- **Categoría I:** Un ILS estándar se considera de Categoría I, lo que permite aterrizajes con una visibilidad mínima de 732 m ó 549 m en caso de que haya iluminación de la línea central y zonas de toma de pista y un mínimo de techo de nubes de 60 m.
- **Categoría II:** Los sistemas más avanzados de Categoría II y Categoría III permiten operaciones con visibilidad prácticamente nula, pero requieren de una certificación adicional por parte del avión y la tripulación. Las aproximaciones de Categoría II permiten aterrizar con una altura de decisión de 100 pies<sup>2</sup> y una visibilidad de tan sólo 350 m.

---

<sup>2</sup> En aviación son muy utilizadas las unidades de medida pie y milla náutica o nM (algunos libros también utilizan las siglas en mayúsculas NM). Las equivalencias con respecto al metro son las siguientes:

1 nM = 1.852 m

1 pie = 0,3048 m

- **Categoría III:** es la que vuela el sistema de aterrizaje automático de la aeronave y permite operaciones incluso sin altitudes de decisión:
  - CAT IIIa con visibilidad mejor que 213 m.
  - CAT IIIb con visibilidad entre 46 m y 213 m.
  - CAT IIIc sin rango visual de la pista de aterrizaje.

Cada aparato certificado para operaciones CAT III tiene una altitud de decisión y mínimos de visibilidad establecidos, únicos para cada certificación. Las instalaciones CAT II y CAT III incluyen iluminación de la línea central de la pista y zona de contacto, así como otras ayudas y mejoras.

En la tabla 3-1 se resumen las características principales de las distintas categorías de los sistemas ILS.

Tabla 3-1. Categorías de ILS

	CAT I	CAT II	CAT III A	CAT III B	CAT III C (*)
Techo de nubes	200 pies	100 pies	< 100 pies o sin techo	< 40 pies o sin techo	Sin límite
Visibilidad	> 550 m	> 300 m	> 200 m	< 200 y > 75 m	Sin límite

Mínimos JAR (Joint Aviation Requirements)

(\*) No aprobadas aún por los JAR

Teniendo en vigor la habilitación de vuelo instrumental, se puede realizar un ILS categoría I. Sin embargo, para realizar una categoría II o III la tripulación necesita un entrenamiento específico, teórico y en simulador. Además el avión también tiene que estar certificado y mantenido para este tipo de aproximaciones. Y por último el aeropuerto tiene que estar calificado, y además que se encuentren en vigor los Procedimientos de Baja Visibilidad o LVP para salvaguardar las áreas sensibles y evitar interferencias en las señales del localizador y senda entre otras cosas.

## 3.2 Componentes del Sistema ILS

Un sistema ILS se compone de tres elementos principales:

- **Localizador (Loc):** es uno de los componentes principales del sistema ILS y es el encargado de guiar al piloto en el plano horizontal. El localizador es un sistema de antenas direccionales logperiódicas compuesto por un transmisor VHF que utiliza una frecuencia del rango de 108,1-111,95 MHz (aunque sólo se utilizan frecuencias decimales impares con separación de canales de 50 KHz). El transmisor se encuentra en el eje de la pista, al final de la misma, en el lado opuesto a la dirección de aproximación.

La señal de radio transmitida por el localizador produce un patrón de radiación compuesto por dos lóbulos superpuestos. Los dos lóbulos se transmiten en la misma frecuencia ILS, pero se modulan de forma diferente. Para un avión que se aproxima, el lóbulo del lado izquierdo está modulado por un tono de 90 Hz y el del lado derecho está modulado por un tono de 150 Hz. El receptor calcula la Diferencia de Profundidad de Modulación o DDM de la señal recibida para indicar la corrección requerida por el piloto para estar en la línea central del pista (la DDM es cero en la línea central de ésta). En la figura 3-1 podemos ver el patrón de modulación del localizador y en la figura 3-3 podemos ver la imagen de un localizador real.



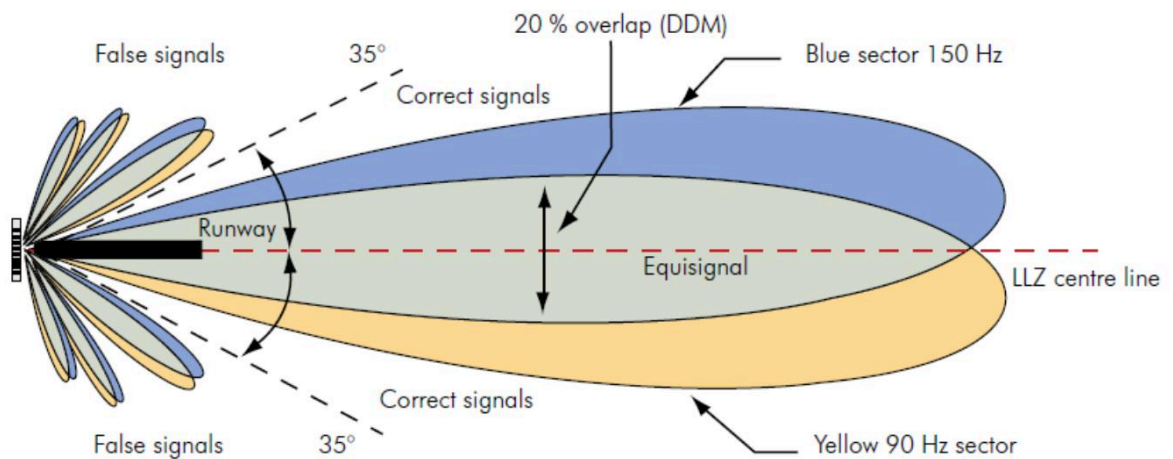


Figura 3-1. Patrón de modulación del localizador

- Senda de planeo (Glide Slope GS ó Glide Path GP): proporciona la guía vertical para el piloto durante la aproximación a tierra. La antena transmisora de la senda de planeo se suele situar unos 300 m del borde del umbral de la pista (tal y como se indica en la figura 3-2) y a 120 m de la línea central de la pista. El transmisor se coloca a 300 m de altura desde el umbral, ya que éste es el punto de contacto óptimo en el que la extensión de la trayectoria de deslizamiento cruza la pista. Esto asegura una holgura de rueda adecuada sobre el umbral y sobre cualquier otro objeto o terreno durante la aproximación de aterrizaje. La senda de planeo tiene lugar en la banda UHF de 329,15 a 335 MHz y la transmisión es similar a la del localizador (mediante dos lóbulos). El lóbulo superior tiene una modulación de 90 Hz y el lóbulo inferior tiene una modulación de 150 Hz. La DDM se usa para indicar si la aeronave necesita ascender o descender para estar en la línea central de la trayectoria de guía.

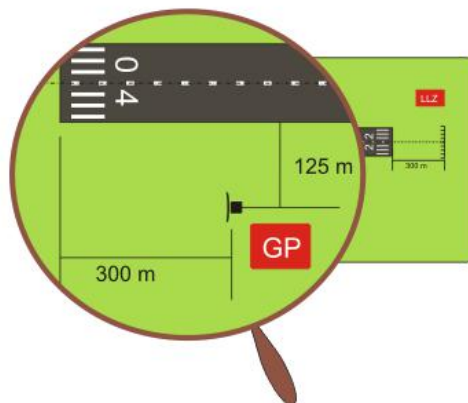


Figura 3-2. Emplazamiento de la senda de planeo



Figura 3-3. Localizador

- Radiobalizas: son un tipo de radioayudas VHF (75 MHz) que ofrecen al aviador la posibilidad de determinar su posición a lo largo de una ruta aérea establecida, en el caso del ILS, alineada con la pista de aterrizaje. Estas señales de color son vistas por el piloto desde la cabina del avión. Existen tres tipos distintos de radiobalizas de ayuda al aterrizaje, que dependen de su posición:
  - Radiobaliza exterior (Outer Marker u OM) identifica el inicio de la senda de aproximación final. Se encuentra situada entre 4 y 7 millas náuticas del umbral de la pista de aterrizaje. Emite dos rayas (en código morse) por segundo, a un tono de 400 Hz, y una señal luminosa de color azul. Se utiliza esta radiobaliza para ayudar a los chequeos de altura, distancia y funcionamiento del equipamiento. Se puede combinar con una baliza no direccional o NBD para crear un marcador externo localizador (LOM).
  - Radiobaliza intermedia (Middle Marker o MM) informa al aviador que se encuentra en la senda de aproximación final y que el contacto con la pista es inminente, buscando que coincida con la altura de decisión de la CAT I (unos 60 m). Es por tanto que a menudo se encuentra situada entre las 0,5 y 0,8 millas náuticas, dependiendo de la senda de planeo establecida en el aeropuerto. Está modulada con un tono de 1.300 Hz y emite puntos y rayas morse alternativos. Su señal luminosa es de color ámbar.
  - Radiobaliza interior (Inner Marker o IM) se instala en la senda de aproximación final para las categorías II y III en la vertical del punto de corte de la misma con el plano de Altitud/Altura de Decisión (DA/H Decision Altitude/Height) mínima de CAT II, a una distancia entre 75 y 450 m del umbral de la pista<sup>3</sup>. Indica al piloto que está a punto de cruzar el umbral de la pista y si no es capaz de visualizar ninguna referencia de la misma, deberá frustrar el aterrizaje. Produce un sonido con una modulación de puntos a 3.000 Hz. También se enciende una luz blanca. El motivo de que no se use en CAT I es que la DA/H en esta categoría es de 60 m y el piloto debe encontrarse en condiciones visuales antes de la radiobaliza intermedia, con lo cual quedaría sin función alguna.

La figura 3-4 muestra los tres tipos de radiobalizas descritos en el párrafo anterior.

<sup>3</sup> El plano de Altitud de Decisión indica la altura a la cual debe empezar a realizarse la maniobra de aproximación a tierra o aterrizaje.

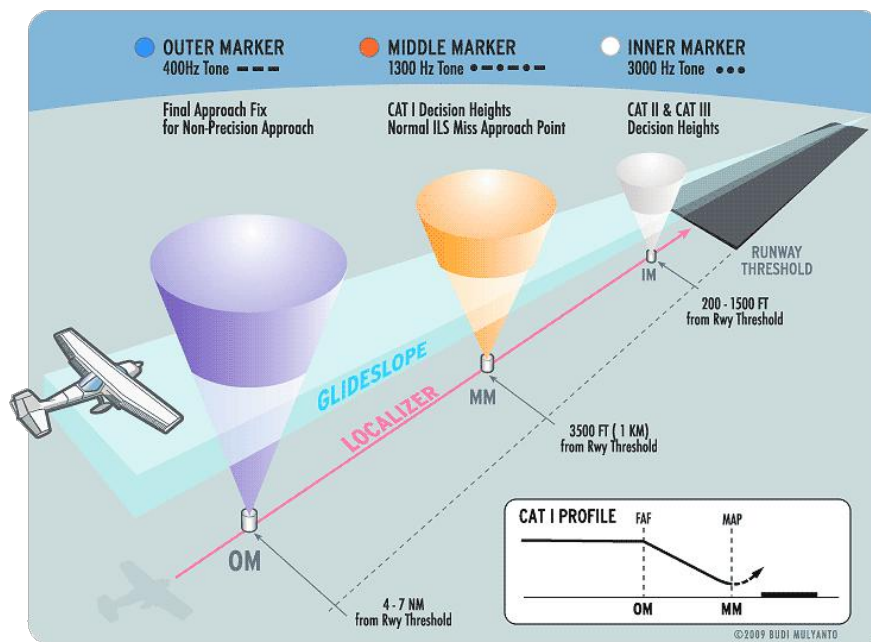


Figura 3-4. Radiobalizas del sistema ILS

### 3.3 Funcionamiento de ILS

El sistema ILS guía al piloto horizontal y verticalmente hacia la pista del aeropuerto hasta que puede conseguir suficientes referencias visuales para poder continuar la aproximación mirando fuera de la cabina y aterrizar.

En la figura 3-5 se muestran los tres componentes de un sistema ILS y la figura 3-6 representa un esquema del funcionamiento del mismo.

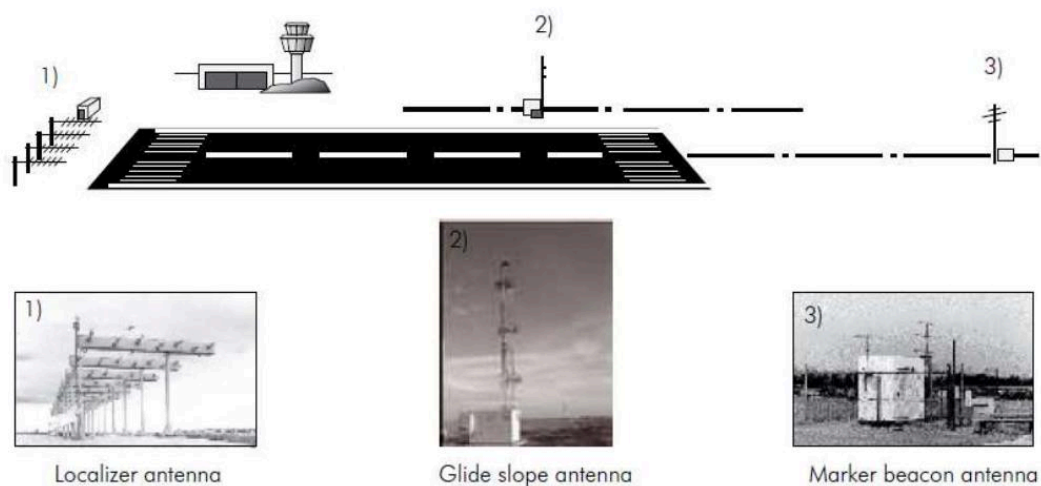


Figura 3-5. Instalación típica de un sistema ILS.

En la figura 3-5, *Localizer antenna* hace referencia al localizador, *Glide Slope antenna* es la senda de planeo y *Marker beacon antenna* son las radiobalizas.

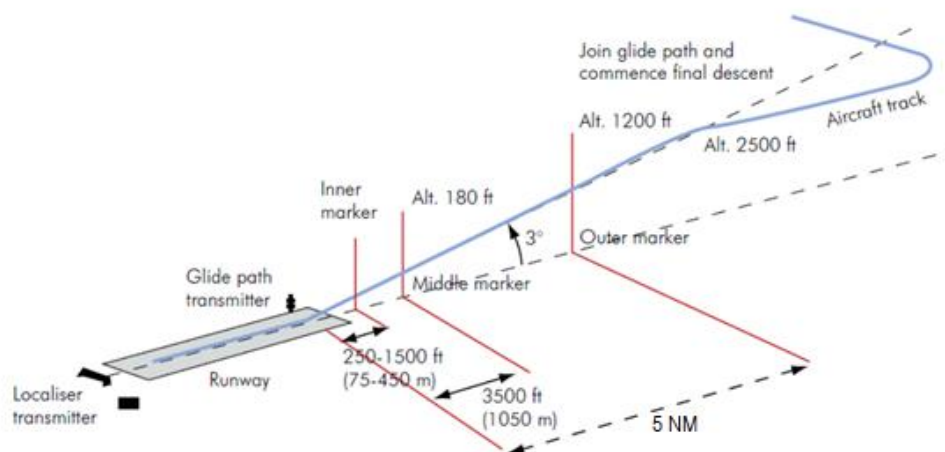


Figura 3-6. Esquema de funcionamiento del sistema ILS

El equipo en tierra (localizador) transmite una portadora comprendida entre los 108,1 MHz y 111,975 MHz, modulada al 20% por una señal resultante de sumar dos tonos de 90 Hz y 150 Hz. Esta señal se denomina Portadora de Bandas Laterales o CSB. A su vez también se transmite una señal con bandas laterales y portadora suprimida modulada con una señal resultante de restar dos tonos de 90 Hz y 150 Hz. Esta señal se denomina señal de banda lateral o SBO.

En la mayoría de los sistemas localizadores, existe una tercera señal denominada señal de Clear o CLR, que sirve de “relleno” para evitar que las aeronaves intercepten falsos nulos y evitar así que crea estar interceptando el eje de pista cuando en realidad no se está haciendo. Dicha señal se transmite con 8 KHz de diferencia respecto a la frecuencia de trabajo del localizador.

Estas tres señales, CSB, SBO y CLR, se distribuyen a las antenas a través del sistema de distribución del localizador. Dicho sistema, meramente pasivo, se compone de fasadores y atenuadores. Su objetivo es entregar a cada antena una proporción adecuada de las tres señales con su potencia y fase adecuadas para conformar un diagrama polar como el mostrado en la figura 3-1.

Una vez que las señales son transmitidas por la antena, se suman en el espacio obteniendo una DDM diferente de las señales de navegación de 90 Hz y 150 Hz en cada punto del espacio. Este tipo de modulación se denomina modulación espacial.

Esto produce que en el lado derecho, la DDM resultante tenga una predominancia de la señal de 150 Hz, en el izquierdo la predominancia de la DDM sea de 90 Hz, atendiendo al sentido de aproximación de la aeronave y en todo el eje de pista la DDM resultante tenga un valor nulo. Las aeronaves en aproximación, tratarán de buscar el nulo de la DDM lo que conlleva en la realidad a posicionarse en el eje de la pista.

Una antena transmisora de la senda de planeo se sitúa a un lado de la zona de la pista donde se produce la toma. La señal GS se transmite a una frecuencia de entre 328,6 MHz y 335,4 MHz, usando una técnica similar a la del localizador; la señal está situada para marcar una senda de planeo de aproximadamente  $3^\circ$  sobre la horizontal.

Las frecuencias del localizador y la senda de planeo están emparejadas de manera que sólo se requiere seleccionar una frecuencia para sintonizar ambos receptores. El localizador proporciona una señal de código morse transmitida a 1.020 Hz para permitir la identificación. Esto permite saber si el ILS está operando con normalidad o si está correctamente sintonizado. Debido a que la señal de senda de planeo no transmite ninguna señal de identificación sólo se depende del localizador.

Para mostrar las señales del ILS en la cabina hay varias maneras. A veces en un instrumento independiente, otras veces en el mismo Indicador de Situación Horizontal o HSI y otras en el mismo horizonte artificial. Las señales del localizador y la senda de planeo se muestran en un instrumento de la cabina, llamado Indicador de Desviación de Curso o CDI, con agujas horizontales y verticales (o un instrumento electrónico que las simule). El piloto controla el avión de manera que las agujas permanezcan centradas en la pantalla del cuadro de

mando, pues es entonces cuando el avión sigue la senda de planeo y la dirección correctas. Las señales también pueden pasarse a los sistemas de piloto automático para permitir que éste vuele la aproximación. La presentación en el instrumento de la cabina consiste en dos barras: una vertical y otra horizontal. La barra vertical indica al piloto si la pista está a la izquierda o la de derecha. Si tenemos la barra vertical a la izquierda quiere decir que la pista está a la izquierda y que tendremos que virar hacia ese lado hasta que la barra vertical se centre. La barra horizontal nos indica cómo de altos vamos en referencia al ángulo de descenso. Si tenemos la barra por debajo significa que vamos altos y tendremos que aumentar nuestro régimen de descenso hasta que se centre la barra. En la figura 3-7 podemos ver cómo se verían las señales del ILS en la cabina de un avión.



Figura 3-7. Sistema ILS en la cabina de un avión

### 3.4 Futuro de ILS

Debido a la fiabilidad de los equipos y al buen resultado que están dando, todo apunta que a que en el futuro seguirán funcionando este tipo de aproximaciones. Solamente en aeropuertos con una orografía complicada puede que se sustituya por aproximaciones RNAV debido a la flexibilidad que ofrecen para evitar los obstáculos geográficos. RNAV o Navegación Aérea es un método que permite a un avión elegir cualquier rumbo dentro de la cobertura de las ayudas en tierra, en lugar de volar directamente de una radio ayuda a otra. Este método permite conservar las distancias de vuelo, reducir tráfico y volar a aeropuertos sin radioayudas.

### 3.5 El Sistema ILS en el Aeropuerto Madrid-Barajas

Como ya se comentó en el apartado anterior, el aeropuerto de Madrid-Barajas cuenta con un sistema ILS de Categoría III. Las características de los ILS son las siguientes:

- Pista 32L: localizador MAA<sup>4</sup> emitiendo en 109.900 MHz desde 40°29'10.3810"N 003°34'38.5956"O, senda de planeo emitiendo en 333.800 MHz desde 40°27'57.0555"N 003°33'17.5709"O.
- Pista 32R: localizador MBB emitiendo en 109.100 MHz desde 40°29'49.4289"N 003°33'36.1747"O, senda de planeo emitiendo en 331.400 MHz desde 40°28'34.5222"N 003°32'13.6731"O.

<sup>4</sup> MAA, MBB, IML e IMR son siglas que se utilizan para identificar los diferentes localizadores ILS del aeropuerto Madrid-Barajas en función de su ubicación.



- Pista 18L: localizador IML emitiendo en 111.500 MHz desde 40°29'54.2065"N 003°33'33.0949"O, senda de planeo emitiendo en 332.900 MHz desde 40°31'31.5282"N 003°33'28.9570"O.
- Pista 18R: localizador IMR emitiendo en 110.700 MHz desde 40°29'24.5249"N 003°34'28.5949"O, senda de planeo emitiendo en 330.200 MHz desde 40°31'11.7539"N 003°34'24.1107"O.

Sólo las pistas mencionadas en el párrafo anterior son las utilizadas para el aterrizaje de aeronaves y es por ello que son en las que se implementa el sistema ILS. En la figura 3-8 podemos observar las cuatros pistas de aterrizaje del Aeropuerto de Barajas más en detalle.



Figura 3-8. De arriba abajo y de izquierda a derecha: Pista 18R, Pista 18L, Pista 32L y Pista 32R

En este subapartado vamos a proceder a realizar algunas simulaciones mediante el programa ICS Telecom para comprobar el funcionamiento del sistema desde el punto de vista radio. Realizaremos estudios de cobertura y mejor servidor. Pero antes de ello, vamos a proceder a realizar una breve descripción del software utilizado.

### 3.5.1 Introducción a ICS Telecom

ICS Telecom es la plataforma de modelado desarrollada por la empresa ATDI para la planificación de redes de telecomunicaciones y la gestión del espectro de frecuencias. Se centra en las necesidades de diseño de red para

operadores comerciales, reguladores del espectro, fabricantes de equipos y consultores. Una de las principales fortalezas de ICS Telecom radica en el modelado de redes heterogéneas con características y funciones dedicadas.

ICS Telecom es el paquete clave en el juego de herramientas de un planificador. Es capaz de modelar sistemas radio de cualquier tamaño, desde áreas locales intensivas hasta extensas en todo el país. Este software permite al ingeniero de planificación desarrollar grandes redes de área amplia de forma rápida y económica. ICS Telecom tiene características y funciones que admiten todas las redes de radio modernas, tanto fijas como móviles, y en todo el rango de frecuencia de 10 kHz a 450 GHz.

ICS Telecom es un software de simulación de radiocomunicaciones basado en un sistema de información cartográfica. Permite realizar todo tipo de simulaciones y representaciones de los sistemas de radiocomunicaciones más desplegados en el medio, con la posibilidad de evaluar el desempeño de los mismos con la mayor precisión posible.

ICS Telecom es una caja de herramientas integral para el modelado de comunicaciones de radio en las bandas de frecuencia MF / HF / VHF / UHF / SHF / EHF. Algunos ejemplos de las tecnologías que se pueden modelar y analizar en el software son:

- Radio móvil terrestre
- Acceso inalámbrico fijo (punto a punto y punto a multipunto - 802.16d WiMAX, WiFi Mesh, microondas, LMDS / MMDS, TETRA / TETRAPOL, etc.)
- Celular / móvil (GSM, GPRS, CDMA / EVDO / EDGE, HSDPA / HSUPA, 802.16e WiMAX, LTE)
- Transmisión (televisión y radio analógica y digital, transmisión simultánea y multidifusión)
- Sistemas de telemetría
- Comunicaciones interiores (WiFi, 802.16e WiMAX)
- Radiolocalización y comunicaciones marítimas
- Radiolocalización aeronáutica y comunicaciones
- Sistemas de radar
- Estaciones terrenas de satélite

Su interfaz gráfica es fácil de usar. En la figura 3-9, podemos observar la primera pantalla que nos aparece al abrir el programa. A través de ella podemos seleccionar un proyecto ya creado o crear uno nuevo.

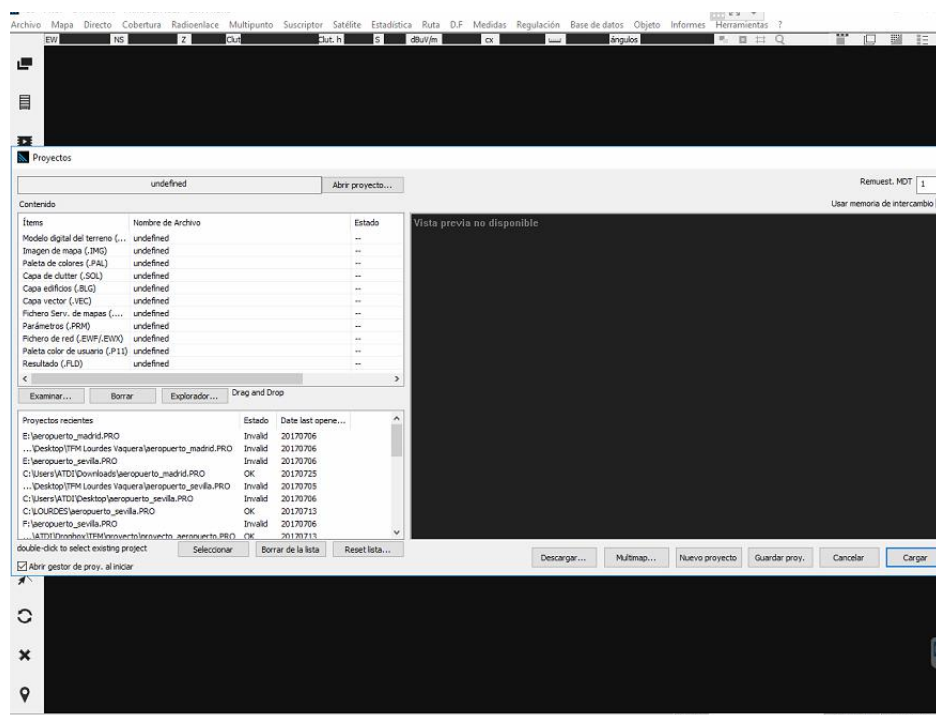


Figura 3-9. Pantalla Inicial de ICS Telecom

Una vez cargado el proyecto ya podemos trabajar en él. Y la interfaz gráfica pasaría a tener la apariencia que se muestra en la figura 3-10. En la parte central tenemos el mapa en el cual situaremos los diferentes elementos de comunicación y alrededor de él se encuentran todas las herramientas necesarias para trabajar: modificación de configuraciones, elaboración de análisis, realización de simulaciones, etc.<sup>5</sup> [18]

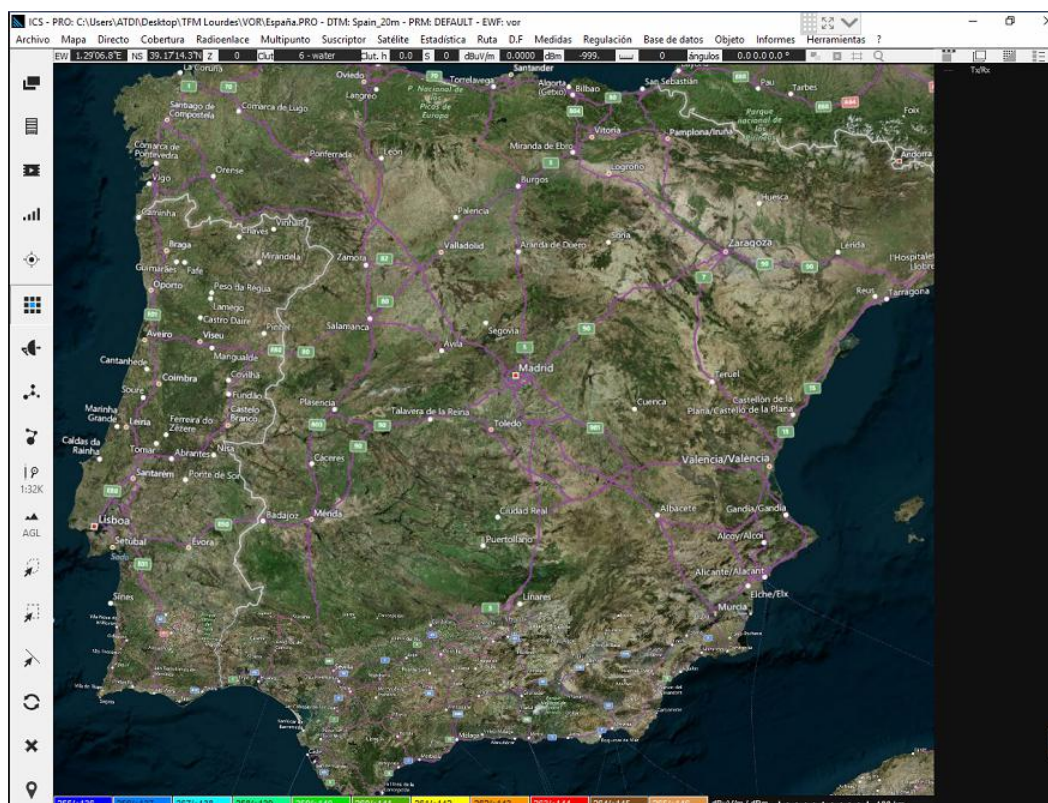


Figura 3-10. Interfaz gráfica de ICS Telecom

### 3.5.2 Simulaciones en el Aeropuerto Madrid Barajas

Una vez y conocido el programa utilizado para la realización de las simulaciones e identificadas cada una de las pistas de aterrizaje, procedemos a colocar los diferentes localizadores en los emplazamientos correspondientes (situados en las coordenadas indicadas anteriormente). En la figura 3-11 podemos ver los emplazamientos de los localizadores. Como se puede observar, están colocados tal y como se explicó en el apartado 3.3: al final de cada pista de aterrizaje y alineado con ella.

Antes de comenzar a mostrar los resultados obtenidos tras la simulación, comentar que éstas se ha realizado siguiendo el modelo de la ITU-R528. Esta recomendación de la ITU describe las curvas de propagación para los servicios móvil aeronáutico y de radionavegación aeronáutica que utilizan las bandas de ondas métricas, decimétricas y centimétricas. Este modelo de la ITU es apropiado para trayectos largos y grandes alturas (superiores a 1.000 m) del receptor. [19] [20]

<sup>5</sup> El objetivo de este proyecto no es explicar en detalle el funcionamiento de ICS Telecom. En el caso de que alguna persona esté interesado en ello, podrá consultar numerosas referencias y tutoriales en internet. El siguiente enlace pertenece a la web del fabricante del software y en él podrá encontrar algunos vídeos explicativos: <http://www.atdi.com/ics-online/>





Figura 3-11. Localizadores situados en los correspondientes emplazamientos

Como se puede comprobar en la figura 3-11, los localizadores están colocados al principio de cada una de las pistas del aeropuerto y orientados en la misma dirección de ellas (tal y como se describieron en un subapartado anterior).

Seguidamente se va a proceder a realizar un análisis de cobertura, para así demostrar cómo el nivel de señal de ILS llega a todos los puntos del aeropuerto permitiendo de este modo emplear dicho sistema para realizar aterrizajes sin problema alguno.

Antes de proceder a la realización de las simulaciones, hay que configurar los distintos parámetros de las antenas. Dicha configuración se muestra en la figura 3-12. En ella podemos ver los patrones de radiación, la altura de las antenas transmisoras (1,8 m), potencia de transmisión (15 w), ganancia (12 dB), etc.

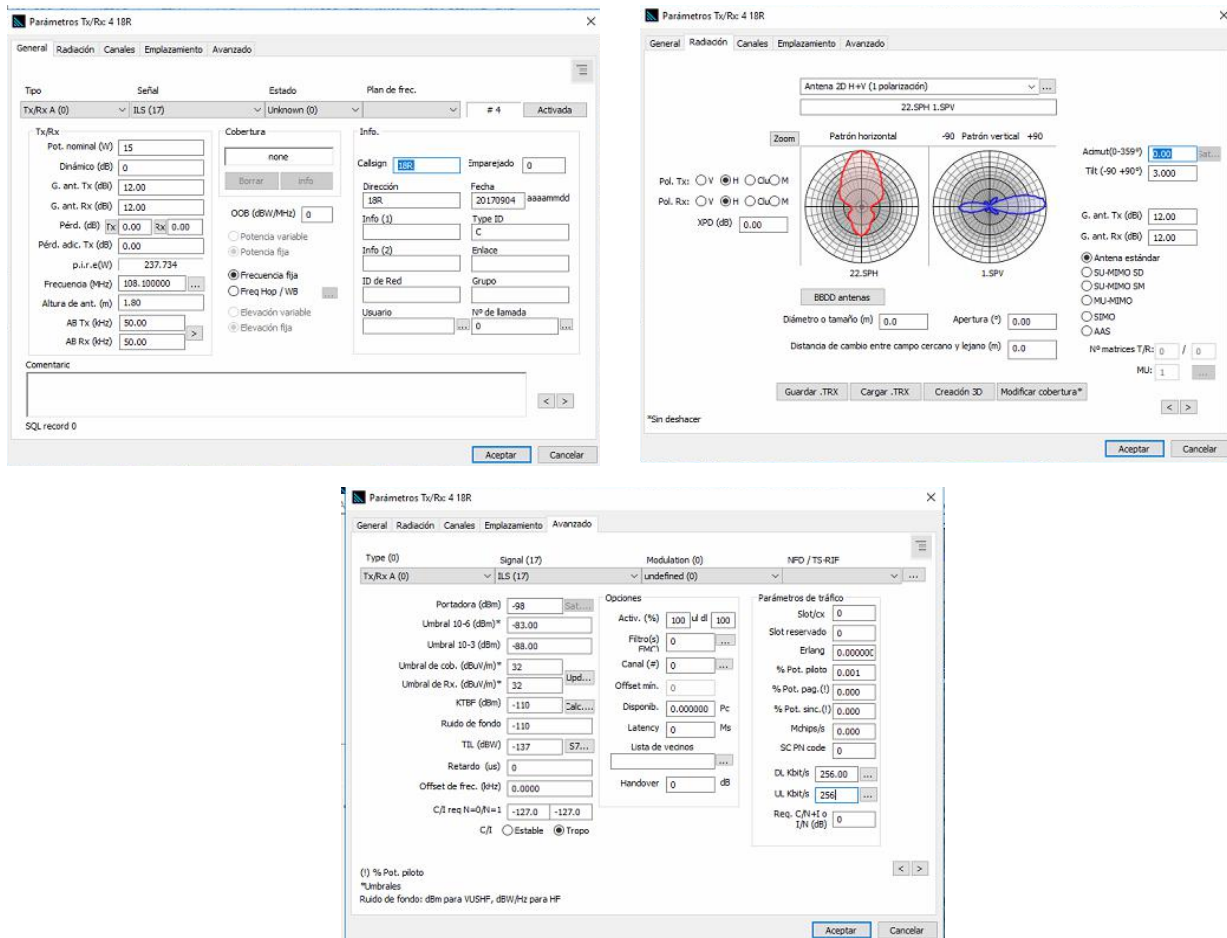


Figura 3-12. Localizadores situados en los correspondientes emplazamientos

Las figuras 3-13 y 3-14 representan los resultados obtenidos tras realizar un análisis de cobertura del sistema ILS del aeropuerto de Madrid-Barajas. Cada color representa un rango de nivel de señal diferente. Así por ejemplo el marrón oscuro representa un rango en torno a  $75 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  (que equivale a  $-43 \text{ dBm}$ ) y el azul turquesa se corresponde con  $47 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  (que equivale a  $-71 \text{ dBm}$ ).



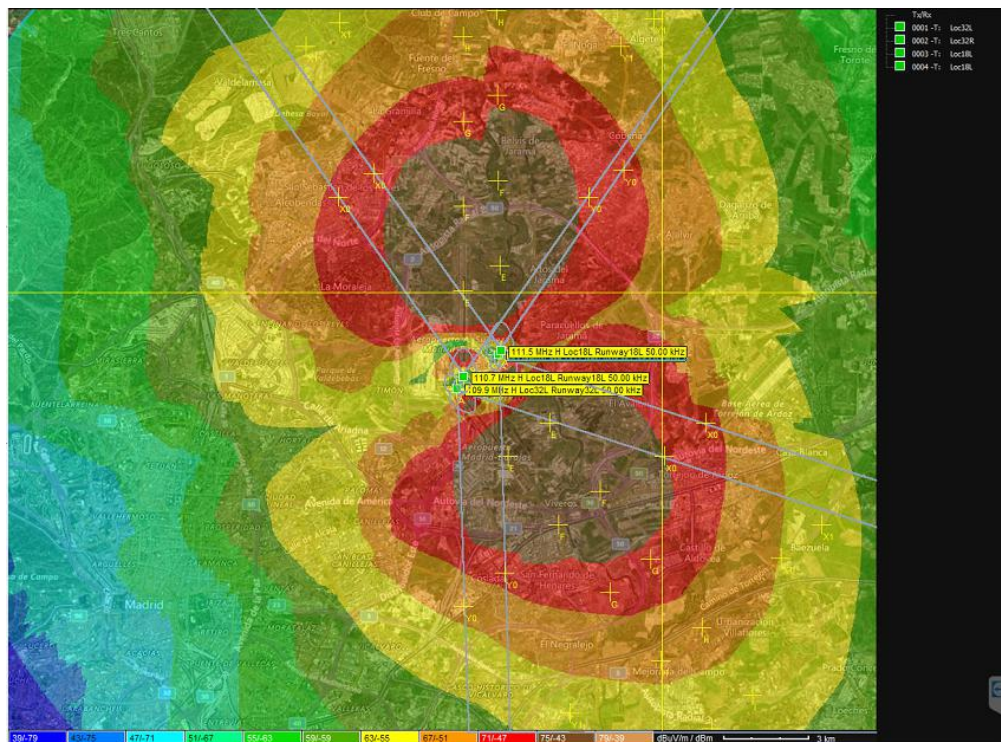


Figura 3-13. Análisis de cobertura de los localizadores ILS

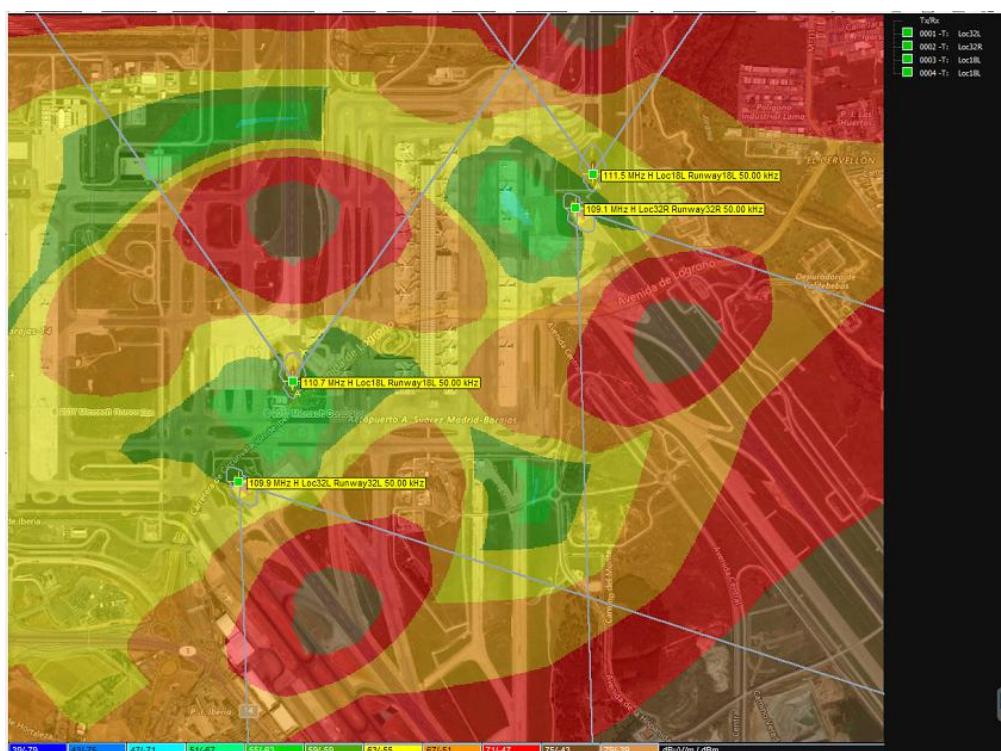


Figura 3-14. Análisis de cobertura de los localizadores ILS (II)

Además del análisis de cobertura mostrado en las figuras 3-13 y 3-14, también hemos obtenido otras representaciones gráficas que nos muestran el correcto funcionamiento del sistema ILS en Barajas.

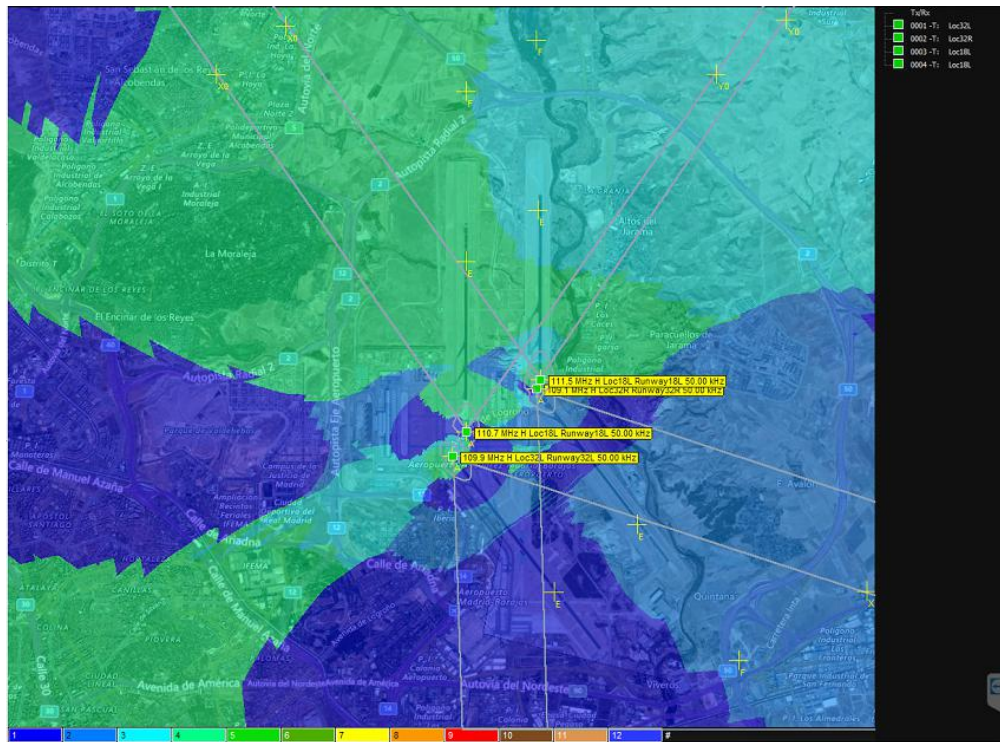


Figura 3-15. Análisis de mejor servidor de los localizadores ILS

En la figura 3-15 mostramos el análisis de mejor servidor del sistema ILS. Mediante este tipo de análisis podemos comprobar cuál es el localizador que ofrece mejor nivel de señal en cada uno de los puntos del mapa.

También hemos analizado el solapamiento de los distintos localizadores. En la figura 3-16 podemos ver de cuántos localizadores estamos recibiendo señal en cada lugar del mapa. El azul más oscuro marca los lugares a los cuales llega la señal de un único servidor. El azul un poco más claro denota las zonas a las cuales llega señal de dos servidores. Las zonas marcadas en azul turquesa son aquellas a las que llega la señal de 3 servidores y las zonas verdes son aquellas a las que llega la señal de los 4 localizadores. También habría que destacar que aquellas pequeñas zonas marcadas en rosa fucsia son aquellas a las que no estaría llegando señal de ninguna de las antenas.



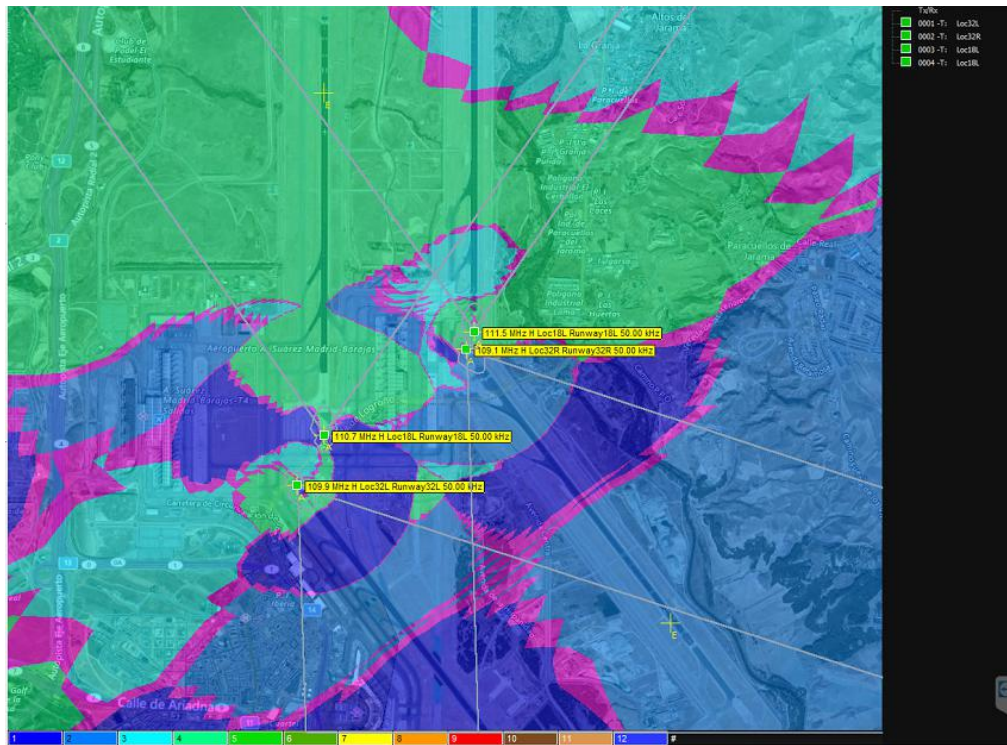


Figura 3-16. Análisis solapamiento de servidor de los localizadores ILS

ICS Telecom proporciona múltiples herramientas para analizar el resultado de la cobertura. Una de ellas es el perfil de trayectoria, mediante el cual podemos ver el nivel de señal en un punto determinado y la orografía del terreno en ese punto.

Las figuras 3-17 y 3-18 muestran los perfiles de trayectoria obtenidos desde los localizadores de las pistas 18L y 18R respectivamente. El software calcula directamente el perfil desde el emplazamiento marcado en la dirección a la que está apuntando la antena (no permite seleccionar al usuario una dirección). El parámetro que sí se puede modificar es el de la altura de la antena receptora, que en nuestro caso sería el receptor ILS situado en el avión. Para estas simulaciones hemos considerado una altura del receptor igual a 1.000 m.

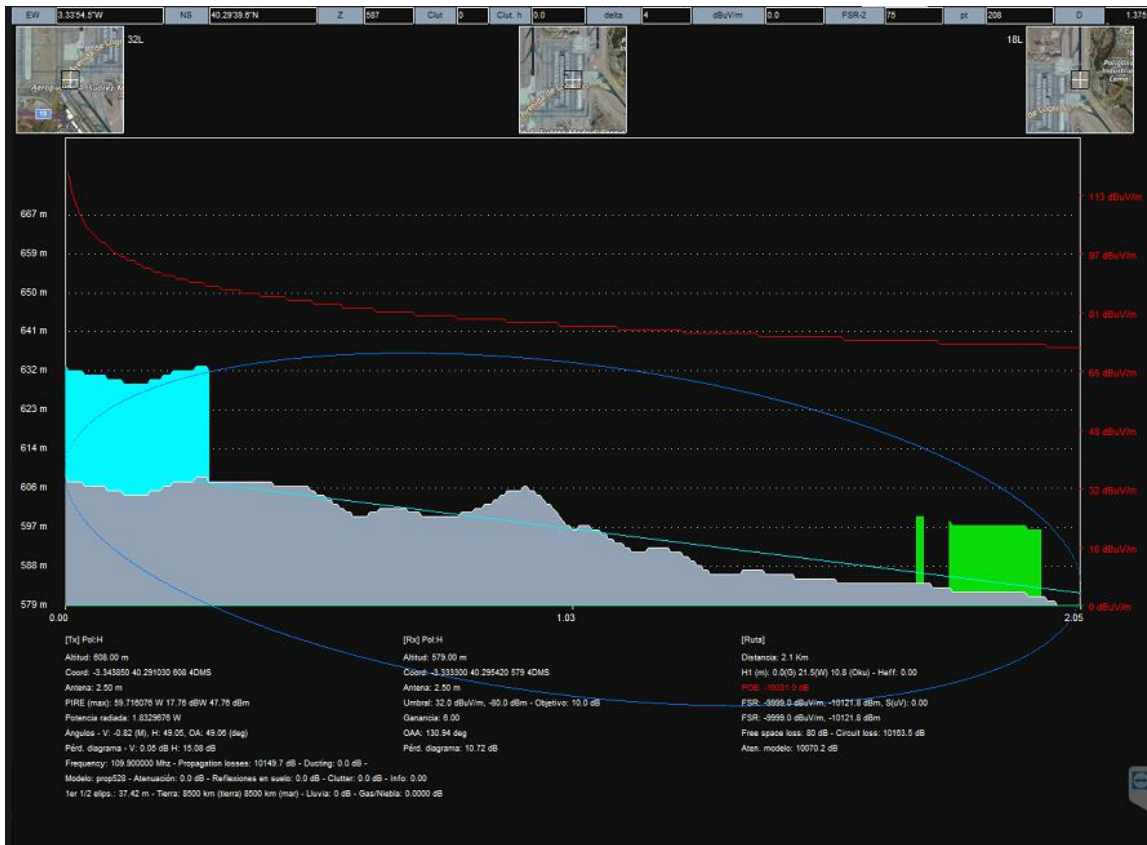


Figura 3-17. Perfil de trayectoria desde el localizador situado en la pista 18L

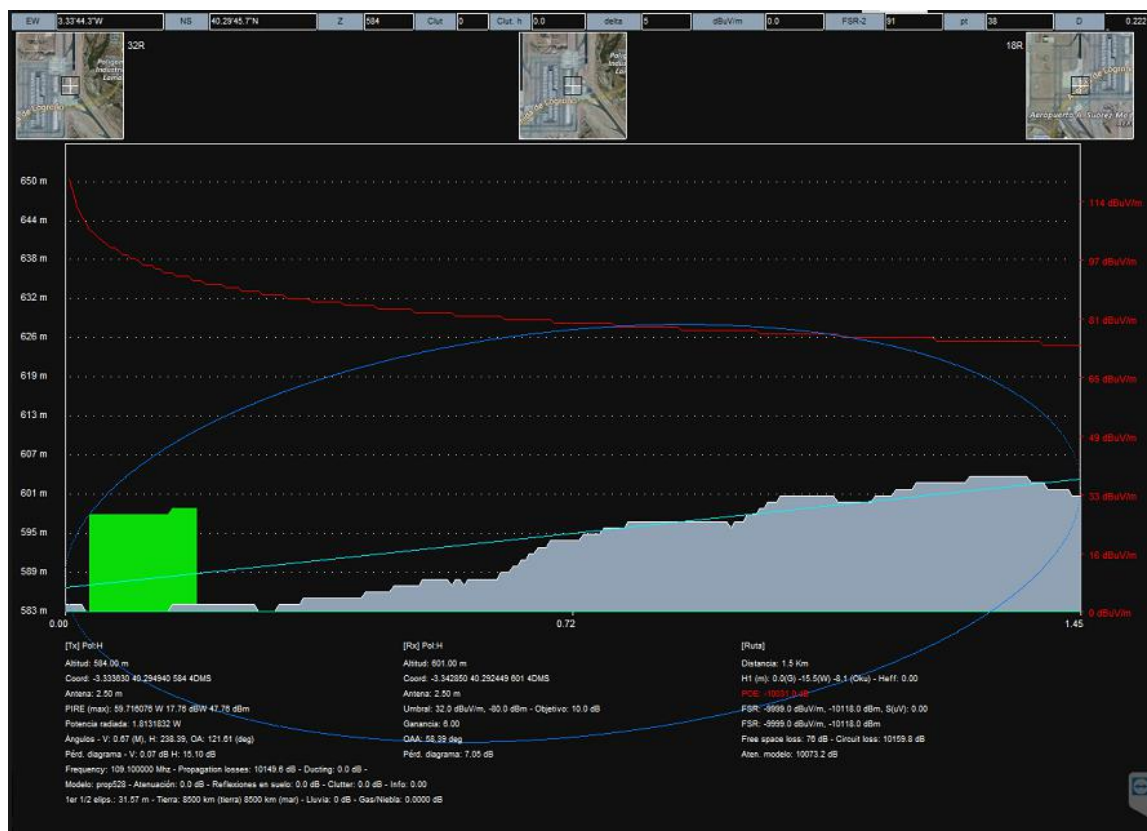


Figura 3-18. Perfil de trayectoria desde el localizador situado en la pista 18L

## 4 SISTEMA VOR

El sistema de radionavegación VOR (Very High Frequency Omnidirectional Range) es uno de los sistemas más usados. Surgió durante la II Guerra Mundial y se convirtió en la guía fundamental de la navegación civil a partir de los años 50. [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31]

El sistema VOR consta de estaciones en Tierra (como la mostrada en la figura 4-1) que transmiten señales a frecuencias entre 108 y 118 MHz (banda VHF) y, gracias al equipo receptor instalado en una aeronave, permiten trazar carreteras aéreas por las que circulan los aviones y que se denominan aerovías. Los sistemas embarcados nos permiten conocer en que dirección o rumbo se encuentran las estaciones de Tierra y lo normal es viajar sobre las trayectorias que unen unos VOR con otros. A menudo una estación VOR incluye un sistema denominado DME (Distance Measurement Equipment), que permite calcular la distancia que nos separa de la estación. Pero un DME es un complemento al VOR, no parte del mismo. Cada VOR transmite en una frecuencia característica, de modo que la idea es conectarse a uno en concreto, el más cercano, o aquel que queremos utilizar como referencia.



Figura 4-1. Estación VOR en Tierra

La base del sistema VOR se puede explicar con el siguiente ejemplo: supongamos un faro para la navegación marítima, el cual emite un haz de luz giratorio a una velocidad angular constante " $\omega$ " [rad/s] conocida. Además, cada vez que dicho haz pasa por una dirección de referencia, por ejemplo el norte magnético, el faro emite un destello en todas las direcciones de forma que tanto el haz como el destello son identificables por separado. Un barco que desea conocer su dirección relativa respecto al faro, no tiene más que medir el tiempo " $t$ " que transcurre entre el destello y el paso del haz por su posición. Así pues, el ángulo (en radianes) que forma la recta que une barco y faro con la dirección de referencia viene dado por la ecuación (1).

$$\alpha = \omega * t \quad (1)$$

En torno a una estación de tierra VOR dibujamos un medidor de ángulos donde el 0 corresponde a la semirrecta que comienza en la posición del VOR y apunta hacia el norte. A partir de ahí dibujamos los ángulos en sentido horario, según se describe en la figura 4-2. El avión dibujado representa la posición de la aeronave. Cada grado define una ruta o calle, de modo que tendremos 360 rutas. Por tanto, en la figura 4-2, la aeronave está siguiendo la ruta situada a  $315^\circ$  del norte magnético, dejando a su espalda la ruta situada a  $135^\circ$  del norte magnético. El equipo embarcado en el avión nos indicará si estamos orientados hacia el VOR que estamos sintonizando según una cierta calle.

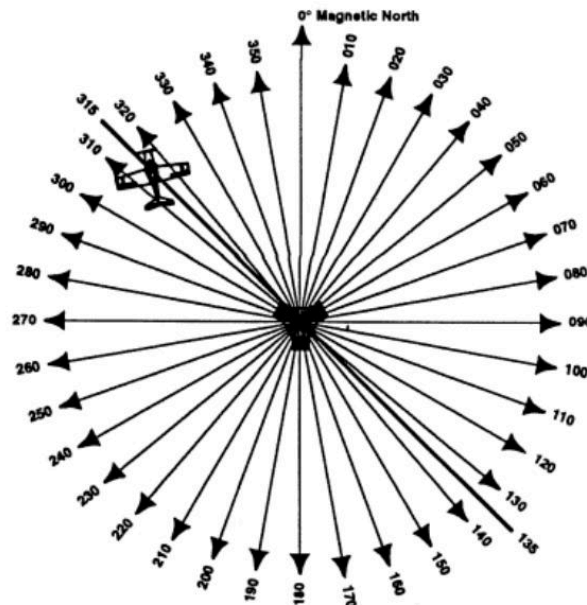


Figura 4-2. Rutas o calles de un sistema VOR

Así, el indicador en el panel del avión tiene el aspecto dado en la figura 4-3 e incluye:

- Un indicador denominado OBI ú OBS (OmniBearing Indicator u OmniBearing Selector ), que nos permite elegir la calle que queremos utilizar como referencia.
- El CDI (Course Deviation Indicator), que es la aguja que tiene una posición inclinada a un lado u otro de la vertical; nos da una idea de cómo de desviados estamos de la calle, en un rango de  $\pm 10^\circ$ ; si aparece inclinada de arriba a abajo y a la izquierda significa que debemos girar hacia la izquierda y análogamente para la derecha, siempre y cuando estemos orientados hacia el VOR, y al revés si lo tenemos de espaldas
- Un indicador que nos dice si el ángulo que marca la calle seleccionada en el OBI está medido desde (FROM) o hacia (TO) el VOR



Figura 4-3. Indicador VOR en el panel de un avión

El indicador VOR mostrado en la figura 4-3 señala que deberíamos volar en la ruta  $340^\circ - 150^\circ$  para interceptar el radial desde (FROM) la estación VOR.



Es inmediato darse cuenta de que la medida dada por el VOR no proporciona el sentido de mira, hacia el VOR o desde él. El indicador FROM/TO lo que me dice es si, cuando fijo una calle en el OBI, estoy en un lado o en otro del VOR, pero no me dice en qué dirección está mirando la parte delantera del avión. Esto es importante a la hora de leer el CDI: si estoy mirando hacia el VOR (TO) y el CDI se encuentra a la izquierda de la vertical debo girar a la izquierda para situarme sobre la calle indicada en el OBI, momento en el cual el CDI se encuentra vertical, y a la derecha si el CDI está a la derecha. Sin embargo, si tengo al VOR de espaldas (FROM) habré de girar a la derecha en el primer caso y a la izquierda en el segundo. Es conveniente, pues, averiguar con la ayuda de la brújula o del Indicador de Situación Horizontal (HSI) este particular y cambiar en 180° el OBI si estoy mirando de espaldas al VOR, de modo que cambiaré de FROM a TO o al revés, y miraré de frente al VOR, de modo que el CDI me sea más intuitivo.

Debido a que puede haber estaciones VOR relativamente cercanas entre sí y con mínimas diferencias entre sus frecuencias, puede darse el caso de sintonizar una frecuencia errónea y viajar hacia un VOR equivocado. Un caso especialmente dramático ocurrió en 1983, cuando un avión de pasajeros Boeing 747 coreano fue derribado por cuatro cazas soviéticos por invadir el espacio aéreo de la URSS al confundirse de radiofaro. Los VOR se identifican, además de por su frecuencia, por un código Morse de tres letras. No obstante, los sistemas VOR se encuentran normalmente duplicados y se suelen utilizar para sintonizar dos VOR diferentes y protegerse contra inconsistencias. Sin embargo, a día de hoy se cuenta con el apoyo de los sistemas GPS, que tienen un papel similar al que pueden tener en un coche o vehículo de superficie cuando circula por una carretera, siendo el papel de dicha carretera sustituido en el caso de la navegación aérea por las aerovías definidas por los sistemas VOR. Ambos son necesarios: aerovías y sistema GPS.

A la hora de seguir una ruta hay que tener también en cuenta aspectos como que el morro del avión puede no estar apuntando en la dirección de movimiento en determinadas condiciones del viento o que la trayectoria sobre el suelo o derrota no es trivial dada la trayectoria aérea, porque la Tierra rota bajo el avión. En este sentido sí señalamos algo que no hemos mencionado: cuando volamos por encima de la zona que separa el FROM del TO, normalmente perdemos contacto con la estación VOR, debido a la conformación de los diagramas de radiación que no son completamente omnidireccionales y no “pierden” energía radiando hacia arriba o hacia el suelo. En ese momento, en lugar de FROM o TO, el indicador de la cabina marca OFF.

## 4.1 Tipos de estaciones de tierra VOR

Hay tres tipos de estaciones VOR de tierra:

- Terminal (T): desde 1.000 pies sobre el nivel suelo o AGL (Above Ground Level) hasta e incluyendo 12.000 AGL pies con un radio de 25 millas náuticas. El rango de frecuencia utilizado es 108-112 MHz.
- Baja Altitud (L): desde 1.000 pies AGL hasta e incluyendo 18.000 AGL pies con un radio de 40 millas náuticas. El rango de frecuencia que utiliza este tipo de estación VOR es 112-118 MHz.
- Alta Altitud (H): desde 1.000 pies AGL hasta e incluyendo 14.500 AGL con un radio de 40 millas náuticas, desde 14.500 AGL hasta e incluyendo 60.000 AGL con un radio de 100 millas náuticas. Desde 18.000 AGL hasta 45.000 AGL tiene un alcance de 130 millas náuticas. Trabaja en el rango de frecuencia de 112-118 MHz.

## 4.2 Análisis de un sistema VOR desde el punto de vista radio

El sistema VOR opera en diversos canales en la banda 108-117,95 MHz, dejando 50 kHz de separación entre canal y canal, y quedó estandarizado en 1.949. Sólo utiliza frecuencias con decimales pares, ya que las frecuencias con decimales impares son utilizadas en el sistema ILS visto en el capítulo anterior. Transmite, sobre una portadora  $\omega_c$  de VHF con polarización horizontal, tres señales:

- Una señal de referencia omnidireccional de 30 Hz.
- Una señal variable con la dirección (o rotatoria) de 30 Hz. La fase de esta señal depende de la dirección en que se encuentre el receptor.

La medida del ángulo  $\theta$  o ángulo VOR, se fundamenta en la comparación de la fase entre las dos señales de  $\omega_m=30$  Hz. La estación de tierra radia un patrón cardioide que rota a 30 rps, generando una onda senoidal a 30 Hz en el receptor del avión (señal variable). Este patrón de radiación se muestra en la figura 4-4. La estación de tierra también radia una señal omnidireccional, modulada en frecuencia con un tono de 30 Hz fijo (señal de referencia). El avión conoce su “marcación” o ángulo respecto al Norte,  $\theta$ , por la diferencia de fase entre la señal de referencia y la señal variable.

La señal variable modula en amplitud directamente a la portadora, mostrando además una modulación espacial en fase. Como necesitamos una señal de referencia a 30 Hz y no se puede añadir otra modulación AM a la portadora a 30 Hz (ya está ocupada por la señal variable), se emplea una subportadora a  $\omega_{ref} = 9.960$  Hz. Esta subportadora se modula en frecuencia con un seno a 30 Hz (dando un ancho de modulación FM de  $\pm 480$  Hz). La subportadora modulada de 9.960 Hz modula a su vez, en AM, a la portadora, con una profundidad de modulación del 30%. Además, la portadora está modulada al 10% en amplitud por un código Morse  $f(t)$  a la frecuencia  $f_i = 1.020$  Hz. Este código Morse hace de identificación, emitiendo dos o tres veces por minuto. Todo ello se representa en la ecuación (2) donde  $\omega_p$  representa a la portadora principal se encuentra en una frecuencia  $f_p$  entre 108 y 118 MHz,  $A$  es la amplitud de modulación AM y toma un valor de 0,33 y  $\beta$  es el índice de modulación FM y es igual a 16.

$$v_{vor} = \cos(\omega_p) [A * \cos(\omega_{ref}t + \beta * \sin(\omega_m t)) + A * \cos(\omega_{ref}t + \phi) + f(t) * \cos(\omega_i t)] \quad (2)$$

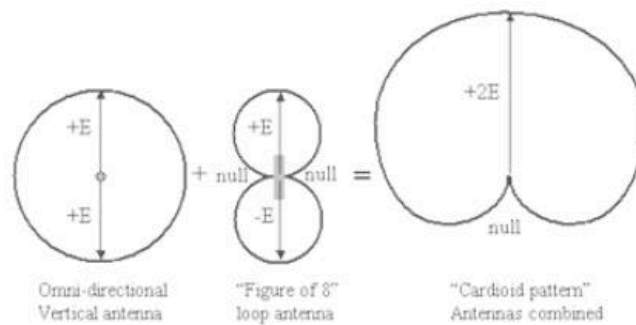


Figura 4-4. Patrón de Radiación de VOR

A las frecuencias VOR, las distorsiones atmosféricas son prácticamente despreciables. Las características de propagación, por otro lado, requieren que se ha de tener el radiofaro dentro de la línea visual, ya que la onda de superficie es demasiado débil. Lo que limita el alcance debido a la curvatura de la tierra en función de la altura del avión. La normativa OACI establece una cobertura óptima de VOR para estaciones distanciadas unos 200 Km con potencias de emisión de 200 W para el VOR en ruta (tanto VOR-L como VOR-H) y de 50 W para el VOR-T (VOR Terminal). Como hemos dicho, el sistema VOR indica la dirección del avión al transmisor, definiendo así la línea de posición (LOP) o radial. La intersección de dos radiales da una posición o fix, igualmente la podemos conseguir mediante una medida combinada de las medidas de un VOR y un DME.

### 4.3 Precisión de VOR

La precisión predecible de un VOR es  $\pm 1,4^\circ$ . Sin embargo, datos de prueba indican que el 99,94% del tiempo con un sistema VOR tiene menos que  $\pm 0,35^\circ$  de error. Los sistemas VOR son internamente monitorizados y comunican cualquier error de la estación que exceda  $1,0^\circ$ .

La norma ARINC<sup>6</sup> 711-10 del 30 de enero de 2.002 establece que la precisión del receptor debería estar dentro de  $0,4^\circ$  con una probabilidad estadística del 95% bajo varias condiciones. Cualquiera de los receptores instalados en aviones cumplen con este estándar bien o suele excederla.

## 4.4 VOR Doppler

El VOR explicado en el subapartado anterior se denomina VOR convencional o CVOR. Frente a él tenemos el VOR Doppler o DVOR. Veamos cuáles son las ventajas del segundo.

El multicamino o multipath es la principal fuente de error de los sistemas VOR. Una manera de corregirlo es usar antenas de mayor tamaño, más direccionales, y otra es utilizar el hecho de que las señales FM son menos sensibles a las reflexiones que las AM. El DVOR es una mejora de precisión al VOR Convencional CVOR (precisión de  $0,5^\circ$  frente a  $2^\circ$  respectivamente). DVOR se ve menos afectado por las reflexiones de obstáculos cerca de las antenas.

La antena DVOR se compone de una circunferencia formada por 26 parejas de antenas de dipolo y una antena de dipolo (omnidireccionales) en el centro. En la figura 4-5 podemos ver una antena de este tipo. En cada instante sólo hay 3 antenas alimentadas, la central (o referencia) y una pareja. Conectando secuencialmente las antenas de una agrupación, podemos simular una antena que gira y produce una modulación en FM sintética, debida al desplazamiento Doppler. Una antena del par transmite a  $f_p+9.960$  Hz y la otra a  $f_p-9.960$  Hz. La conmutación del par activo se realiza de modo que desde el receptor el DVOR se ve como un par giratorio de antenas a rotando a una velocidad  $f_{vor}$  expresada en rps (revoluciones por segundo).



Figura 4-5. Antena DVOR

En el receptor se suma la señal de la antena que se aleja y de la antena que se acerca, cada una con un desplazamiento doppler diferente ( $\pm(V\sin\theta/\lambda)$  respectivamente). La señal suma resultante es una subportadora en 9.960 Hz, modulada en frecuencia.

Para asegurar la compatibilidad con el receptor, es obligatorio que el desplazamiento doppler recibido de cada antena periférica sea  $\Delta f=480$  Hz. Para la banda de frecuencias de portadora del VOR eso fija el radio

<sup>6</sup> ARINC o Aeronautical Radio Incorporated, establecida en 1929, es un importante proveedor de comunicaciones de transporte y soluciones de ingeniería de sistemas para ocho industrias: aviación, aeropuertos, defensa, gobierno, salud, redes, seguridad y transporte.

de la circunferencia a 6,76 m.

## 4.5 Futuro del Sistema VOR

Como ocurre con otras formas de radionavegación aérea utilizadas actualmente, es posible que el VOR sea reemplazado por sistemas satelitales como el GPS. El GPS es capaz de localizar la posición horizontal de una aeronave con un error de sólo 20 m. Si se utiliza el GPS combinado con el WAAS<sup>7</sup> (Wide Area Augmentation System), el error se reduce a un cubo de 4 m de lado. Esta precisión instrumental se aproxima (con posicionamiento lateral y vertical) a la Categoría I de los sistemas ILS actuales. Refinamientos posteriores incluyen el LAAS<sup>8</sup> (Local Area Augmentation System), que probablemente permita aproximaciones equivalentes a la categoría III del ILS, para prácticamente aterrizar con cero visibilidad. El LAAS está planeado para utilizar una banda de frecuencia VHF para sus mensajes de corrección del GPS, lo cual requerirá que otras estaciones terrestres de radio locales (radionavegación o frecuencias de comunicación por voz) utilicen frecuencias diferentes para evitar interferencias.

## 4.6 El Sistema VOR del Aeropuerto Madrid-Barajas

El aeropuerto de Madrid-Barajas cuenta con cuatro sistemas VOR en sus inmediaciones y alrededores.

- DVOR BRA (Barajas, 40°28'08,50"N 003°33'27,59"O): situado junto a la pista 14R/32L.
- DVOR SSY (San Sebastián de los Reyes, 40°32'47.1194"N 003°34'31.3318"O): situado al norte de la cabecera 18R, a 1,5 nM aproximadamente.
- DVOR RBO (Robledillo de Mohernando, 40°51'14.2766"N 003°14'47.4050"O): situado en la Provincia de Guadalajara, en el Término Municipal del mismo nombre, muy próximo al Aeródromo de Robledillo, LERM.
- DVOR PDT (Perales de Tajuña, 40°15'10.4401"N 003°20'52.2750"O): situado a unas 15 nM al sureste de las cabeceras 32L/32R.

A continuación vamos a proceder a realizar algunas simulaciones de estos sistemas con el programa ICS Telecom. Para ello, en primer lugar debemos colocar cada sistema en las coordenadas indicadas. En la figura 4-6 podemos ver los emplazamientos de los VOR que dan servicio al aeropuerto de Barajas. [19]

---

<sup>7</sup> WAAS es un Sistema de Aumentación Basado en Satélites desarrollado por Estados Unidos, a través de la colaboración de Federal Aviation Administration (FAA) y el Department of Transportation (DOT). Consiste en complementar el sistema de satélites GPS con estaciones terrestres que permiten corregir la precisión y la confianza en las coordenadas de posición adquiridas.

<sup>8</sup> LAAS es un sistema de aterrizaje de aeronaves basado en la corrección diferencial en tiempo real de la señal del GPS. Los receptores de referencia local ubicados alrededor del aeropuerto envían datos a una ubicación central en el aeropuerto. Esta información se utiliza para formular un mensaje de corrección, que luego se transmite a los usuarios a través de un enlace de datos VHF

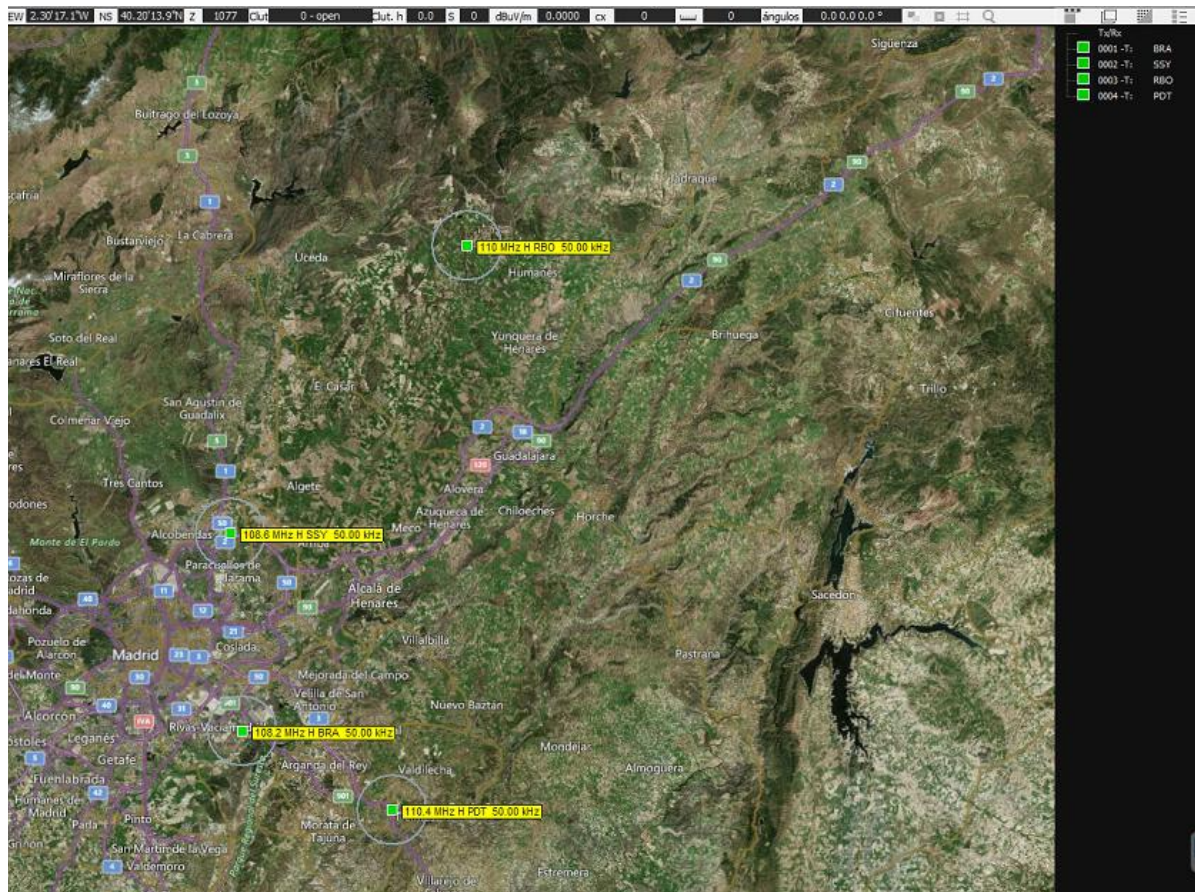


Figura 4-6. Emplazamientos de los VOR que dan servicio al aeropuerto de Madrid

El siguiente paso, es colocar cada VOR en la banda de frecuencia adecuada. En la tabla 4-1 podemos ver la frecuencia de cada una de las antenas.

Tabla 4-1. Frecuencias de los VOR

VOR	Frecuencia (MHz)
BRA	108,2
SSY	108,6
RBO	110,0
PDT	110,4

A continuación, procedemos a realizar el análisis de cobertura de los VOR. En este caso, volvemos a emplear el modelo de propagación ITU-R528.

Los valores de los diferentes parámetros de las antenas VOR se muestran en la figura 4-7. La potencia nominal serán 50 W, la ganancia de las antenas es 0 dB y la altura de las mismas 10m. El patrón de radiación utilizado es el representado en la figura 4-4.



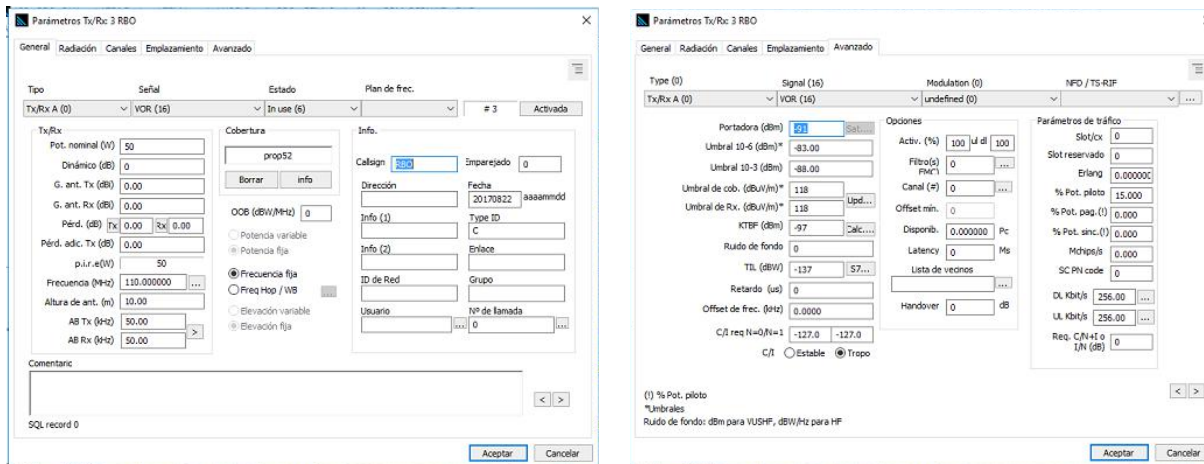


Figura 4-7. Configuración de los parámetros de las antenas VOR

Una vez configurados todos los parámetros de las antenas procedemos a realizar la simulación. En las figuras 4-8 y 4-9 podemos observar los resultados obtenidos tras realizar el análisis de cobertura. El área cubierta en color marrón es aquella en la cual el nivel de cobertura es mayor con un valor de  $-17$  dBm (que sería equivalente a  $101$  dB $\mu$ V/m). El valor más pequeño de nivel de señal se representa en color azul y equivale a  $-57$  dBm ( $51$  dB $\mu$ V/m).

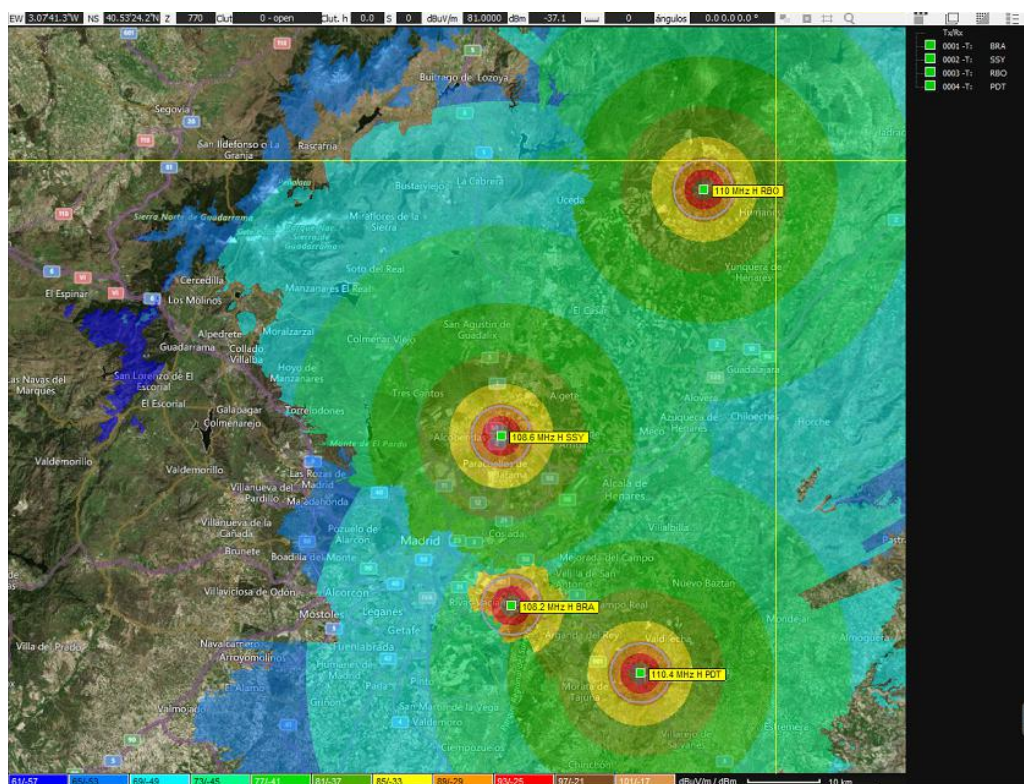


Figura 4-8. Análisis de cobertura VOR de las antenas cercanas al aeropuerto de Madrid – Barajas

La figura 4-9 se obtiene tras hacer zoom a la figura 4-8. En ella podemos ver en más detalle el nivel de señal en las inmediaciones del aeropuerto. En todos los puntos del mismo, el nivel de señal es superior a  $-37$  dBm.

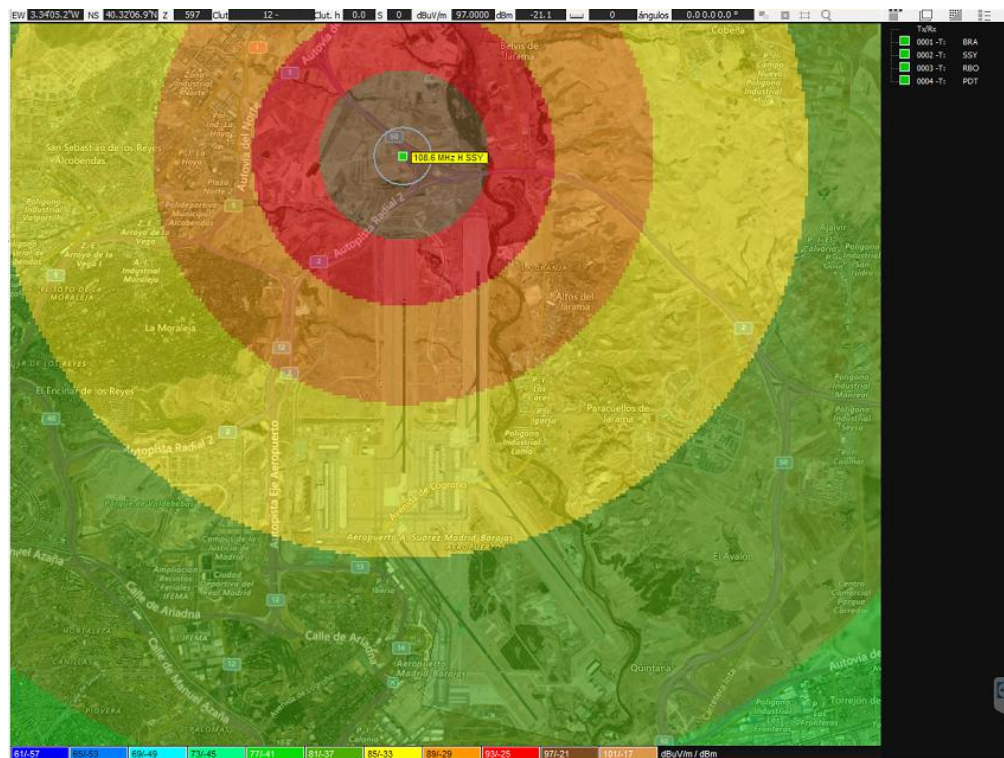


Figura 4-9. Detalle del análisis de cobertura VOR en el aeropuerto de Madrid





# 5 INTERFERENCIAS EN LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN

---

Los sistemas de radiodifusión FM que operan en el rango de frecuencia 87-108 MHz pueden causar interferencias en los sistemas ILS y VOR que operan en la banda de 108-137 MHz. La compatibilidad entre el servicio de radio FM y los servicios aeronáuticos se describen en la norma de la ITU-R denominada SM 1009<sup>9</sup>. [32]

La interferencia producida por el servicio de radiodifusión con modulación en frecuencia a los localizadores del sistema de aterrizaje con instrumentos vistos los apartado anteriores es un problema ampliamente reconocido entre los usuarios de las facilidades de aviación. En los receptores de comunicaciones aire-tierra, dicho problema de interferencia abarca desde la perturbación de las señales de audio a la recepción distorsionada y mutilada. En los localizadores ILS y en los receptores VOR de a bordo, el problema de interferencia abarca desde las molestas señales de audio, hasta errores en la desviación de rumbo. Se considera que la interferencia en estos receptores de navegación es el problema más serio, dado que un error en la desviación de rumbo, especialmente durante la fase crítica de aproximación y aterrizaje, no resulta tan rápidamente evidente para el piloto como la interrupción de las comunicaciones.

La interferencia en los receptores de aeronave varía según la marca y el modelo del receptor de navegación y de comunicaciones. La probabilidad de recibir interferencia perjudicial está aumentando debido a la necesidad creciente de asignaciones adicionales de frecuencia a los servicios aeronáuticos y de radiodifusión.

## 5.1 Tipos de interferencia

La recomendación SM 1009 de la ITU-R considera 4 tipos de interferencia en los diferentes receptores aeronáuticos.

En general, desde el punto de vista de un localizar ILS y de un receptor VOR, la transmisión de radiodifusión con frecuencia modulada puede considerarse como ruido. No obstante, las frecuencias de 90 MHz y 150 MHz son específicas y vulnerables en el localizador ILS, al igual que las frecuencias de 30 MHz y 9.960 Hz lo son en el VOR, ya que dichas frecuencias proporcionan un guiado crítico para los sistemas en cuestión y son por tanto, sensibles a la interferencia.

- **Interferencia Tipo A:** es la causada por las emisiones no deseadas de uno o más transmisores de radiodifusión en la banda aeronáutica.
  - **Interferencia tipo A1:** un solo transmisor puede generar emisiones no esenciales o varios transmisores de radiodifusión pueden modularse entre ellos, produciendo componentes que caen en las bandas aeronáuticas; a esto se le denomina interferencia Tipo A1.
  - **Interferencia tipo A2:** Una señal de radiodifusión puede incluir componentes no despreciables en las bandas aeronáuticas; este mecanismo de interferencia que se denomina interferencia de Tipo A2, se producirá en la práctica únicamente a partir de transmisores de radiodifusión que tengan frecuencias próximas a 108 MHz e interferirá únicamente en las frecuencias de los servicios de localizador ILS/VOR próximos a esa misma frecuencia

---

<sup>9</sup> Si desea profundizar más sobre la recomendación ITU-R SM 1009 puede acceder al siguiente enlace en el cual se encuentra la norma completa: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1009-1-199510-1/es>

- **Interferencia Tipo B:** es la interferencia generada en un receptor aeronáutico por las transmisiones de radiodifusión en frecuencias que caen fuera de la banda aeronáutica.

- **Interferencia tipo B1:** Es la intermodulación que puede generarse en un receptor de a bordo como resultado de que una señal de radiodifusión de alta potencia fuera de la banda aeronáutica, lo ha llevado a la zona de no linealidad. Para que se produzca este tipo de interferencia, son necesarias, al menos, dos señales de radiodifusión con una relación de frecuencia que, en la combinación no lineal, pueda generar un producto de intermodulación dentro del canal RF deseado utilizado por el receptor aeronáutico. Una de las señales de radiodifusión ha de tener suficiente potencia para situar al receptor en la zona de fuerte no linealidad, entonces puede haber interferencia aunque la(s) otras(s) señal(es) puedan ser de bastante menor amplitud.

Sólo se consideran los productos de intermodulación de tercer orden que adoptan la forma siguiente:

$$f_{\text{intermod}} = 2f_1 - f_2 \text{ (caso de dos señales)} \quad (3)$$

$$f_{\text{intermod}} = f_1 + f_2 - f_3 \text{ (caso de tres señales)} \quad (4)$$

siendo  $f_{\text{intermod}}$  : frecuencia del producto de intermodulación (MHz)

$f_1 + f_2 + f_3$ : frecuencia de radiodifusión (MHz), con  $f_1 \geq f_2 > f_3$ .

- **Interferencia tipo B2:** Se denomina así a la desensibilización que ocurre cuando la sección RF del receptor de abordó está sobrecargada por una (o varias) transmisiones de radiodifusión.

## 5.2 Parámetros de evaluación de la compatibilidad

En este apartado se muestran los parámetros de los transistores aeronáuticos ILS y VOR que interesan en una evaluación de compatibilidad.

### 5.2.1 Características de los sistemas aeronáuticos

#### 5.2.1.1 Localizador ILS

##### 5.2.1.1.1 Cobertura operacional designada (DOC)

La figura 5-1 muestra la cobertura operacional designada o DOC (Designed Operational Coverage) típica para la trayectoria frontal de un localizador ILS. La DOC puede también comportar una zona trasera. Algunas administraciones utilizan también el localizador ILS como sistema auxiliar de guiado en la aproximación y la DOC puede no estar alineada con una pista de aterrizaje.

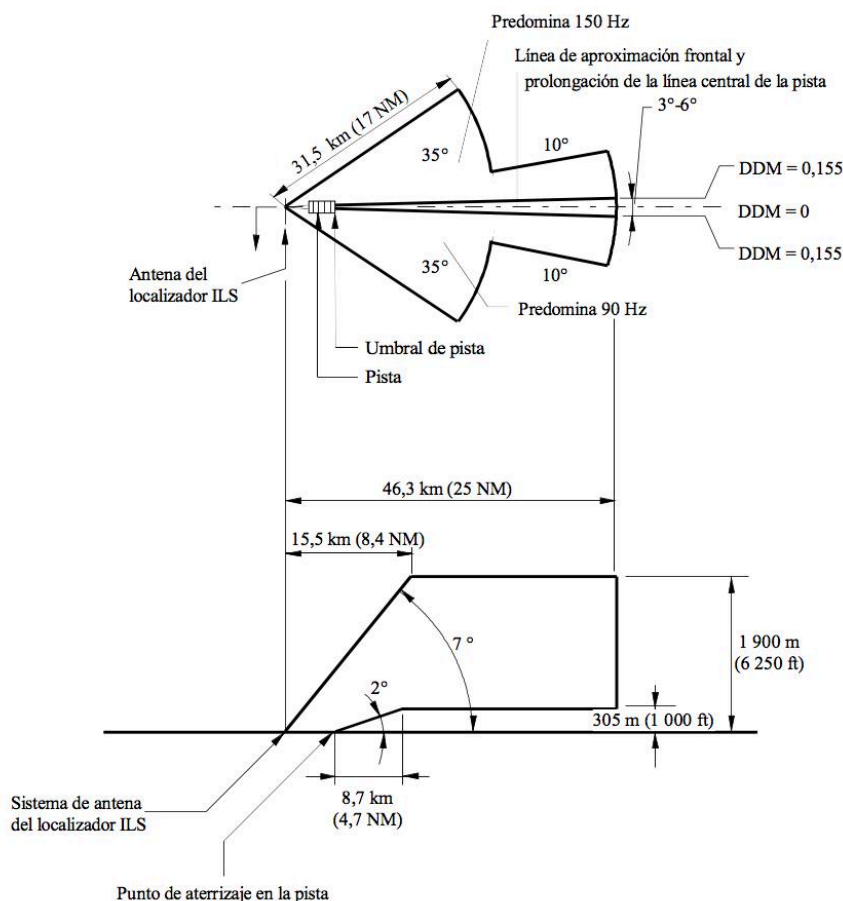


Figura 5-1. DOC frontal típica de un localizador ILS

#### 5.2.1.1.2 Intensidad de campo

La intensidad de campo mínima que hay que proteger con la DOC frontal del localizador ILS es  $32 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$  ( $40 \mu\text{V/m}$ ). Si se da servicio en la zona de cobertura posterior del localizador ILS, la intensidad de campo que hay que proteger también es de  $32 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$ . En ciertas zonas de la DOC del localizador ILS, el OACI prevé una intensidad de campo superior para aumentar la relación señal/ruido recibida, aumentando con ello la robustez del sistema. Este es el caso del sector de la trayectoria fontral del localizador ILS que va desde una distancia de 18,5 Km hasta el punto de aterrizaje en la pista, sector en el que se requieren señales de 39-46  $\text{dB}(\mu\text{V/m})$ , dependiendo de la categoría del ILS.

### 5.2.1.2 VOR

#### 5.2.1.2.1 Cobertura operacional

La DOC de un VOR puede variar de una instalación a otra: por ejemplo, un terminal VOR puede tener un radio de 74 Km y de 370 Km para el caso de un VOR de ruta.

#### 5.2.1.2.2 Intensidad de campo

La intensidad de campo mínima que debe protegerse con la DOC es de  $39 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$  ( $90 \mu\text{V/m}$ ). Los valores nominales de la potencia radiada aparente (p.r.a) necesaria para lograr esta intensidad de campo están dados en la figura 5-2.

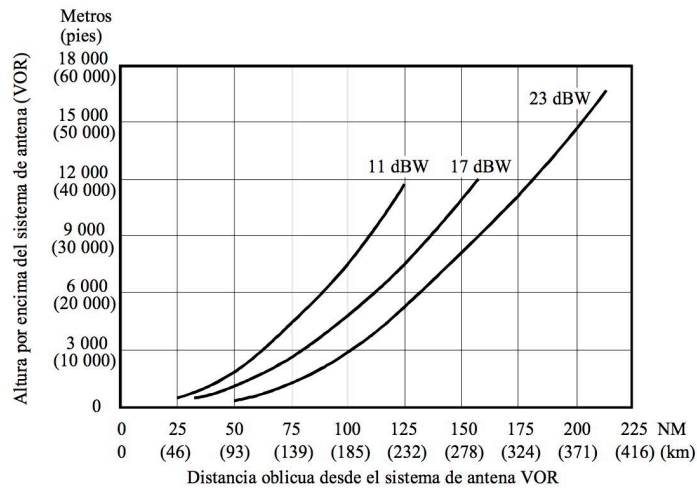


Figura 5-2. Relación en la distancia/altura de la cobertura del VOR en función de la p.r.a.

Las curvas de la figura 5-2 están basadas en una amplia experiencia de la ITU-R con una serie de instalaciones que indican la p.r.a. necesaria para lograr la densidad de potencia especificada en un gran porcentaje de ocasiones, teniendo en cuenta la propagación y las características típicas de la instalación en tierra y de aeronave.

## 5.2.2 Características de las estaciones de radiodifusión con modulación de frecuencia

### 5.2.2.1 Potencia radiada aparente máxima

Debe utilizarse el valor más preciso disponible de la p.r.a. máxima para los cálculos de compatibilidad.

### 5.2.2.2 Diagrama de radiación horizontal

En los cálculos de compatibilidad debe utilizarse la información más precisa disponible sobre el diagrama de radiación horizontal.

### 5.2.2.3 Diagrama de radiación vertical

En los cálculos de compatibilidad debe utilizarse la información más precisa disponible sobre el diagrama de radiación vertical.

### 5.2.2.4 Supresión de emisiones no esenciales

La ITU-R divide al mundo en tres regiones en su Reglamento de Radiocomunicaciones<sup>10</sup> con el propósito de administrar el espectro electromagnético global. Cada región posee su propio conjunto de asignación de

<sup>10</sup> El Reglamento de Radiocomunicaciones es un tratado intergubernamental de la ITU que sirve como un instrumento supranacional para la gestión internacional óptima del espectro radioeléctrico y define los siguientes aspectos:

- La asignación de diferentes bandas de frecuencias a diferentes servicios de radio.
- Los parámetros técnicos obligatorios que deben observarse por parte de las estaciones de radio, especialmente emisoras.
- Los procedimientos para la coordinación (garantizar la compatibilidad técnica) y notificación (registro formal y la protección en el Registro Internacional de Frecuencias) de las asignaciones de frecuencia a las estaciones de radio de los gobiernos nacionales.
- Otros procedimientos y disposiciones operativas.

frecuencias. En la figura 5-3 muestran dichas regiones. La Región 1 aparece coloreada en color amarillo y abarca Europa, África y Oriente Medio, incluyendo a la Península Arábiga, Iraq, la antigua Unión Soviética y Mongolia. En color azul celeste se representa la Región 2 que comprende a América, Groenlandia y algunas islas del Pacífico. Australia y parte de Asia forman la Región 3 que aparece marcada en la imagen en color magenta.

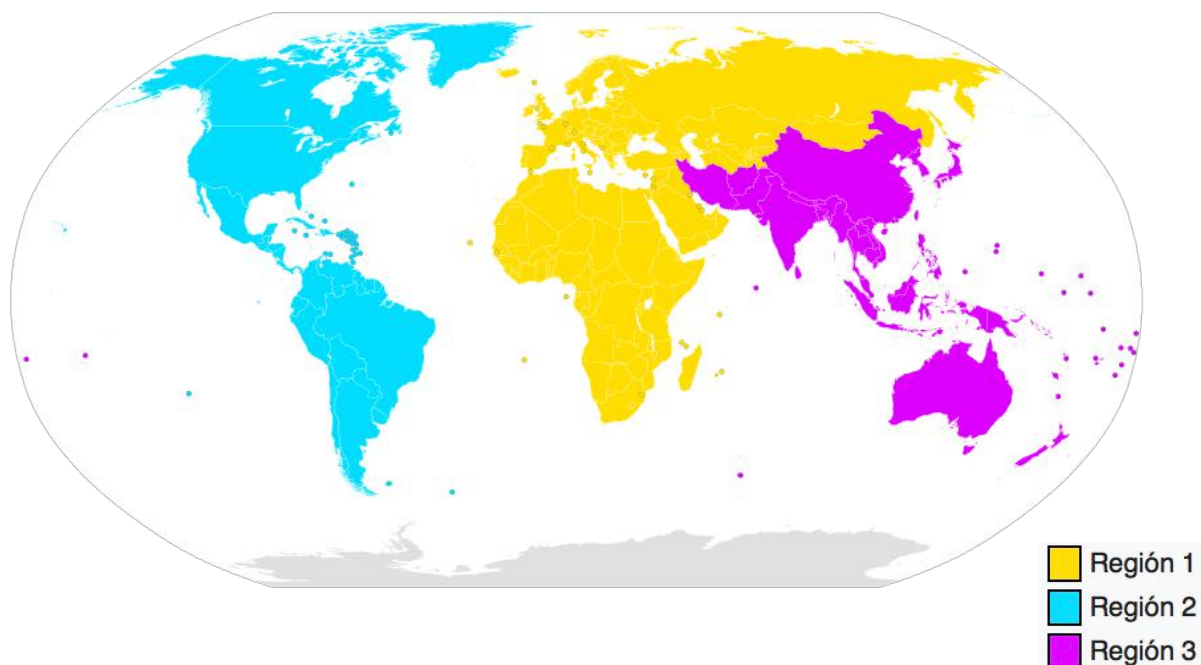


Figura 5-3. Regiones definidas por la ITU-R

En la experiencia de América del Norte, no ha sido, en general, necesario exigir la supresión en más de 80 dB de las emisiones no esenciales. Considerando las circunstancias especiales de la Región 1 y algunas zonas de la Región 3, se recomiendan los valores de la tabla 5-1 para supresión de las emisiones no esenciales en la banda aeronáutica 108-137 MHz, debidas a productos de intermodulación radiados desde transmisores de radiodifusión situados en el mismo emplazamiento.

Tabla 5-1. Supresión de emisiones no esenciales

p.r.a. máxima (dBW)	Supresión con relación a la p.r.a máxima (dB)
$\geq 48$	85
30	76
$<30$	$46 + \text{p.r.a. máxima (dBW)}$

#### 5.2.2.5 Frecuencias

La banda de funcionamiento figura en el Reglamento de Radiocomunicaciones. En la Región 1 y en algunas partes de la Región 3, se utiliza la banda 87,5-108 MHz con canales cada 100 KHz (87,6, 87,7 ... 107,9 MHz). En la Región 2 se utiliza la banda 88-108 MHz con canales cada 200 KHz (88,1, 88,3 ... 107,9 MHz).

### 5.2.2.6 Polarización

La polarización de una señal con modulación de frecuencia puede ser horizontal, vertical o mixta.

### 5.2.2.7 Cálculo de la intensidad de campo en el espacio libre para las señales de radiodifusión

La intensidad de campo en el espacio libre se determina según la fórmula siguiente:

$$E = 76,9 + P - 20 * \log d + H + V \quad (5)$$

siendo

en el trayecto  $E$ : intensidad de campo (dB( $\mu$ V/m)) de la señal de radiodifusión

$P$ : p.r.a. máxima (dBW) de la estación de radiodifusión

$d$ : distancia oblicua (Km)

$H$ : corrección del diagrama de radiación horizontal (dB)

$V$ : corrección del diagrama de radiación vertical (dB)

### 5.2.3 Potencia de entrada en el receptor

Suponiendo un diagrama de radiación de antena de la aeronave sin directividad, las intensidades de campo de la señal de radiodifusión y de la señal aeronáutica se convierten en potencia a la entrada del receptor aeronáutico, según las fórmulas siguientes:

- Para una señal de radiodifusión en la banda 87,5 – 108,0 MHz

$$N = E - 118 - L_s - L(f) - L_a \quad (6)$$

siendo:

$N$ : nivel de la señal de radiodifusión (dBm) a la entrada del receptor aeronáutico

$E$ : intensidad de campo (dB( $\mu$ V/m)) de la señal de radiodifusión

$L_s$ : pérdidas de reparto de la señal, de 3,5 dB

$L(f)$ : pérdidas del sistema de antena dependiente de la frecuencia, a la frecuencia de radiodifusión  $f$ (MHz) de 1,2 dB por MHz, por debajo de 108 MHz

$L_a$ : pérdidas fijas del sistema de antena de 9 dB (siempre se suele considerar este número)

- Para una señal aeronáutica en la banda 108-118 MHz:

$$N_a = E_a - 118 - L_s - L_a \quad (7)$$

siendo:

$N_a$ : nivel de la señal (dBm) a la entrada del receptor

$E_a$ : intensidad de campo (dB( $\mu$ V/m)) de la señal aeronáutica

La figura 5-4 muestra la forma de convertir la intensidad de campo mínima del localizador ILS de 32 dB( $\mu$ V/m) en -98 dBm a la entrada del receptor de una instalación típica de recepción aeronáutica, utilizando la ecuación (7).

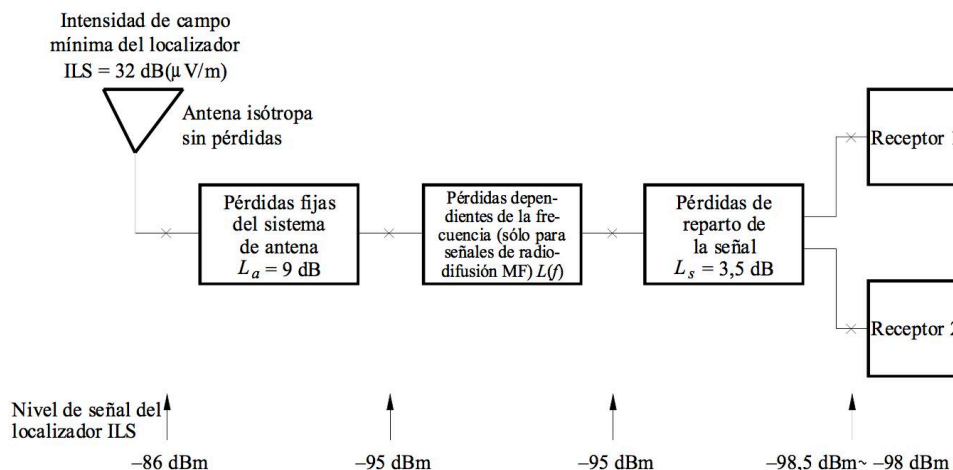


Figura 5-4. Conversión de la intensidad de campo mínima del localizador ILS en un nivel de señal a la entrada de un receptor aeronáutico.

## 5.3 Criterios de evaluación de la compatibilidad

### 5.3.1 Umbrales de interferencia normalizados

Un nivel umbral de interferencia es el nivel de potencia mínimo de una señal interferente que da lugar a una degradación inaceptable de la calidad del receptor. En las mediciones de laboratorio y en las pruebas en vuelo con localizadores ILS y receptores VOR, se ha visto que:

- el umbral de interferencia con el que se produce un cambio de la corriente de guía del rumbo se excede generalmente antes de que aparezca la bandera<sup>11</sup>.
- un aumento de 1 a 3 dB de los niveles de la señal interferente por encima de los niveles de umbral de interferencia dará lugar a un cambio importante de la corriente de guía del rumbo o a que aparezca la bandera.

Empleando señales de radiodifusión simuladas, se utilizaron los umbrales de interferencia que se indicarán en los apartados 5.3.1.1 y 5.3.1.2 para normalizar las mediciones de laboratorio de la interferencia de Tipo A y de Tipo B, habiéndolas elegido de forma que fuesen representaciones razonables de situaciones de explotación típicas.

#### 5.3.1.1 Localizador ILS

Los umbrales de interferencia para una señal deseada con una diferencia de índices de modulación de 0,093 son:

- un cambio en la corriente de guía del rumbo de  $7,5 \mu\text{A}$ ; o
- la aparición de la bandera, según el que se produzca primero

#### 5.3.1.2 VOR

Los umbrales de interferencia de una señal deseada presente son:

- un cambio de la indicación de marcación en  $0,5^\circ$ , correspondiente a una corriente guía del rumbo de  $7,5 \mu\text{A}$ ; o

<sup>11</sup> La bandera es un dispositivo de aviso visual que se materializa en el indicador del piloto con un localizador ILS o receptor VOR y que indica cuando el receptor es operativo, cuando no funciona satisfactoriamente o cuando el nivel de la señal o la calidad de la señal recibida caen por debajo de valores aceptables.

- un cambio en el nivel de la tensión de audio de 3 dB; o
- la aparición de la bandera durante más de 1 s.

## 5.4 Estudio de interferencias en el Aeropuerto Madrid-Barajas

A continuación, vamos a proceder a la realización de algunos análisis de interferencias para comprobar que en el escenario que estamos analizando, el Aeropuerto de Madrid-Barajas, no existe ningún riesgo en los sistemas de navegación aérea causados por las señales de FM que existan en las inmediaciones y lugares cercanos al mismo. [19] [33]

Se van a crear un total de 10 estaciones emisoras en varios núcleos urbanos cercanos al aeropuerto. Los emplazamientos se pueden ver en los próximos subapartados junto con las estaciones ILS o VOR según corresponda.

En la tabla 5-2 se muestran las características de las diferentes estaciones emisoras FM creadas. En ella se pueden comprobar las coordenadas de los emplazamientos, potencia de emisión, ganancias, etc. Comentar que la red FM generada sigue unos datos supuestos, ya que los datos reales son desconocidos.

Tabla 5–2. Características de la estaciones FM

Nombre	Coordenada X	Coordenada Y	Altura (m)	Potencia nominal (KW)	Frecuencia (MHz)	Ancho de banda de transmisión (kHz)	Ganancia (dB)
FM1	- 3,371824	40,30326	75	5	101,9	200	7
FM2	- 3,32377	40,25306	75	2,5	107,7	200	6
FM3	- 3,32291	40,23459	75	3	105,7	200	8
FM4	- 3,29277	40,22171	75	5,5	107,3	200	5
FM5	- 3,29194	40,23456	75	1,5	107,9	200	7
FM6	- 3,30546	40,33013	75	1,5	102,6	200	6
FM7	-3,34592	40,32396	75	5	99,1	200	7
FM8	-3,33940	40,20076	75	7	98,0	200	9
FM9	-3.22202	40,15036	75	8	102,8	200	10
FM10	-3.35012	40,2732	75	9	103,5	200	9

El siguiente paso es configurar los diferentes parámetros de las antenas FM. En la tabla 5-2 mostrada arriba se pueden observar la mayoría de estos parámetros. Lo que nos faltaría por ver es el patrón de radiación de las antenas. En la figura 5-5 se muestra dicho patrón de radiación.



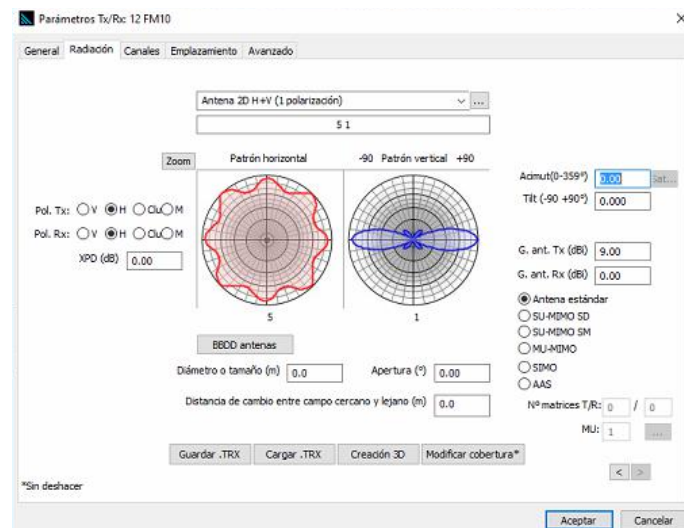


Figura 5-5. Patrón de radiación de las antenas emisoras de radio FM

En los próximos subapartados se van a realizar varias simulaciones variando la potencia de transmisión de las distintas estaciones emisoras de FM. Comenzaremos con la potencia indicada en la tabla 5-2 y la iremos multiplicando por diez hasta llegar al orden de los MW. Tras cada estudio de cobertura iremos comprobando las interferencias producidas en los sistemas ILS y VOR.

### 5.4.1 Interferencias del Sistema ILS

En este subapartado vamos a analizar las interferencias producidas por las estaciones emisoras de radio FM sobre el sistema ILS.

En la figura 5-6 se pueden observar los emplazamientos de las antenas FM junto con los localizadores ILS.

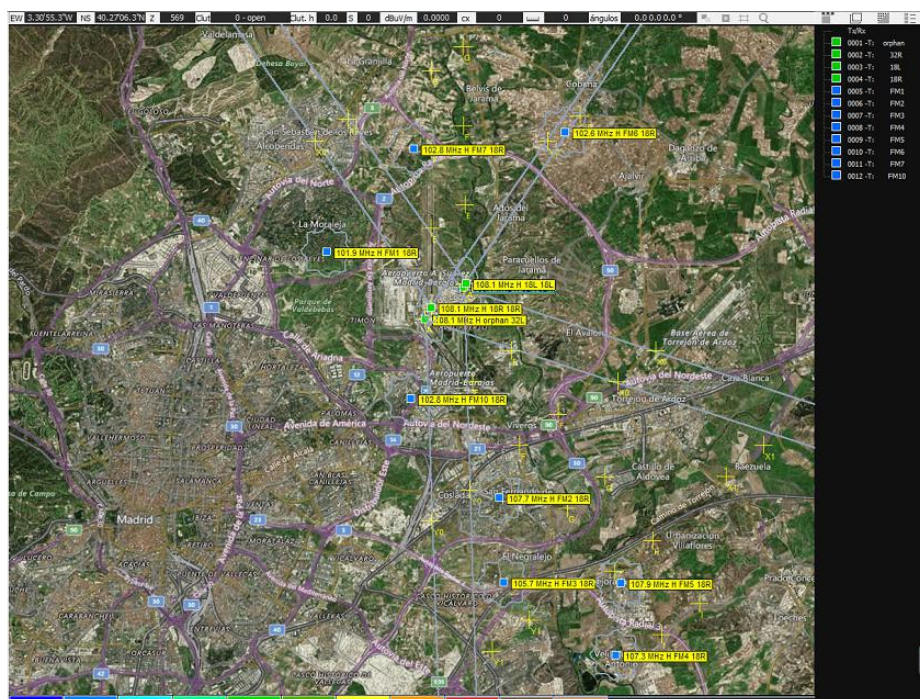


Figura 5-6. Emplazamientos de los localizadores ILS y de las antenas emisoras de radio FM

A continuación pasamos a realizar el estudio de cobertura de las estaciones de radio FM utilizando como valor de potencia de transmisión de las antenas el indicado en la tabla 5-2. El resultado se puede ver en la figura 5-7. Aquellas áreas marcadas en color rojo tienen un nivel de señal de unos 52 dBm. En tono anaranjado se muestran las zonas cuyo nivel de señal es de 47 dBm. En color amarillo están coloreadas las zonas del mapa con un nivel de señal igual a 42 dBm. Los tonos verdes cubren aquellas zonas cuyo nivel de señal es aproximadamente 37 dBm. En color verde agua se muestran aquellas zonas cuyo nivel de señal se encuentra en torno a 27 dBm. Las zonas cuyo nivel de señal es de 22 dBm se encuentran marcadas en color azul celeste. En un color azul más oscuro están coloreados aquellos puntos del mapa cuyo nivel de señal FM es de unos 12 dBm.

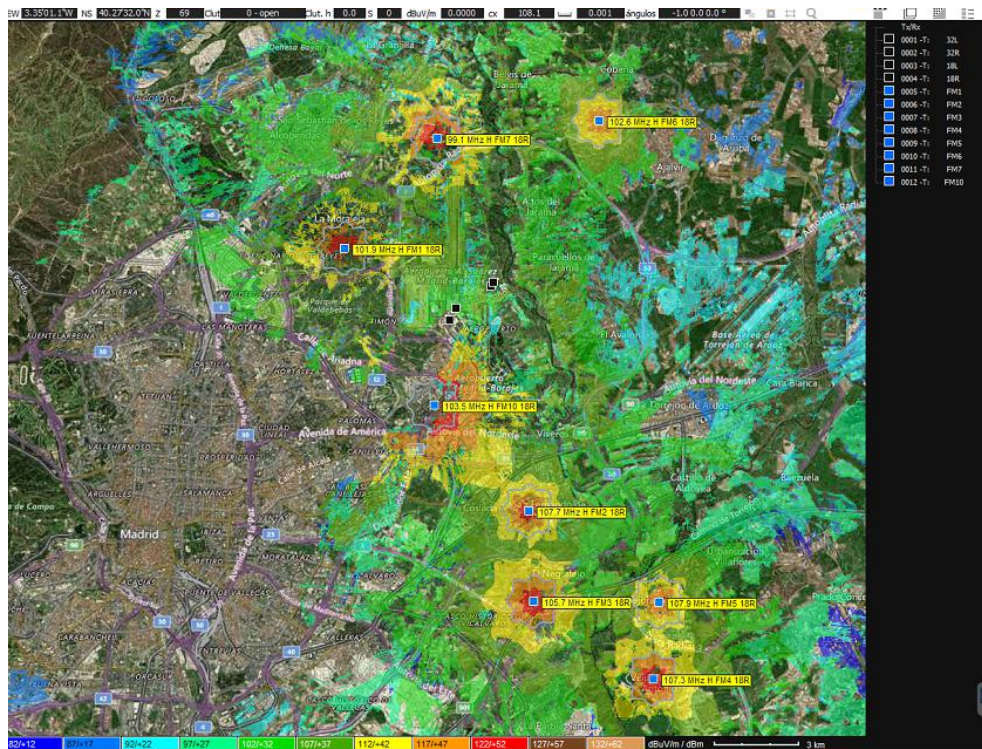


Figura 5-7. Estudio de cobertura de las antenas de radio FM para una potencia de transmisión del orden de KW

ICS Telecom proporciona una herramienta que permite generar informes de interferencia siguiendo la recomendación SM 1009 de la ITU-R. Para cada localizar ILS vamos a generar su informe correspondiente.

Trans generar los informes de los distintos localizadores ILS, obtenemos el mismo resultado para todos: un informe en blanco. Esto significa que en ninguno de los localizadores se están produciendo interferencias. En la figura 5-8 se muestra dicho informe.





Tras la realización de este estudio de cobertura, volvemos a generar los diferentes informes de interferencias para los distintos localizadores ILS y el resultado obtenido vuelve a ser el mismo que en el párrafo anterior. Obtenemos de nuevo un informe en blanco como el mostrado en la figura 5-8. Por la tanto, aunque hemos incrementado la potencia de emisión de las antenas, nuestro sistema ILS sigue siendo inmune a las interferencias que pueden provocar las estaciones emisoras de radio FM.

Seguidamente, volvemos a multiplicar la potencia de transmisión de las antenas de radio FM por diez. Ya nos situamos en potencias de emisión del orden de 100 KW. El estudio de cobertura generado se muestra en la figura 5-10. Al multiplicar la potencia por 10, se incrementa el nivel de señal en 10 dBm en cada zona al igual que ocurrió en el estudio anterior.

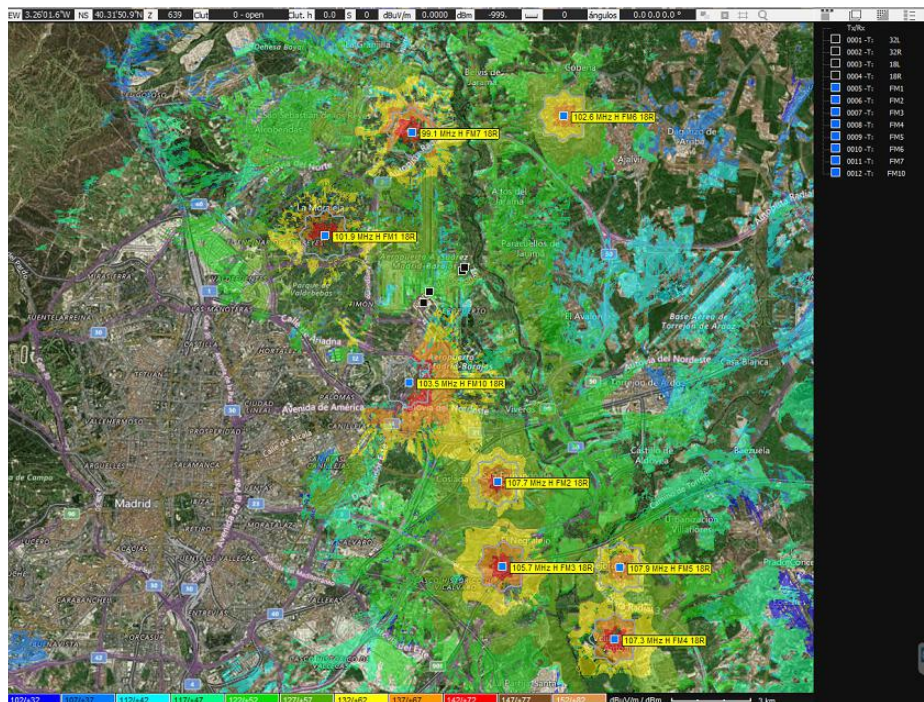


Figura 5-10. Estudio de cobertura de las antenas de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 100 KW

De nuevo volvemos a generar los informes de interferencias para los cuatro localizadores ILS obteniendo de nuevo el mismo resultado que en los dos casos anteriores (figura 5-8): informes en blanco. Aunque hemos aumentado la potencia de emisión de las antenas de FM, el sistema ILS sigue siendo inmune a las interferencias que puedan provocar las antenas de FM

Para finalizar este subapartado, volvemos a incrementar al potencia de transmisión de las estaciones emisoras de FM, llegando al orden de magnitud de los MW. Al realizar el estudio de cobertura correspondiente, obtenemos el resultado mostrado en la figura 5-11.



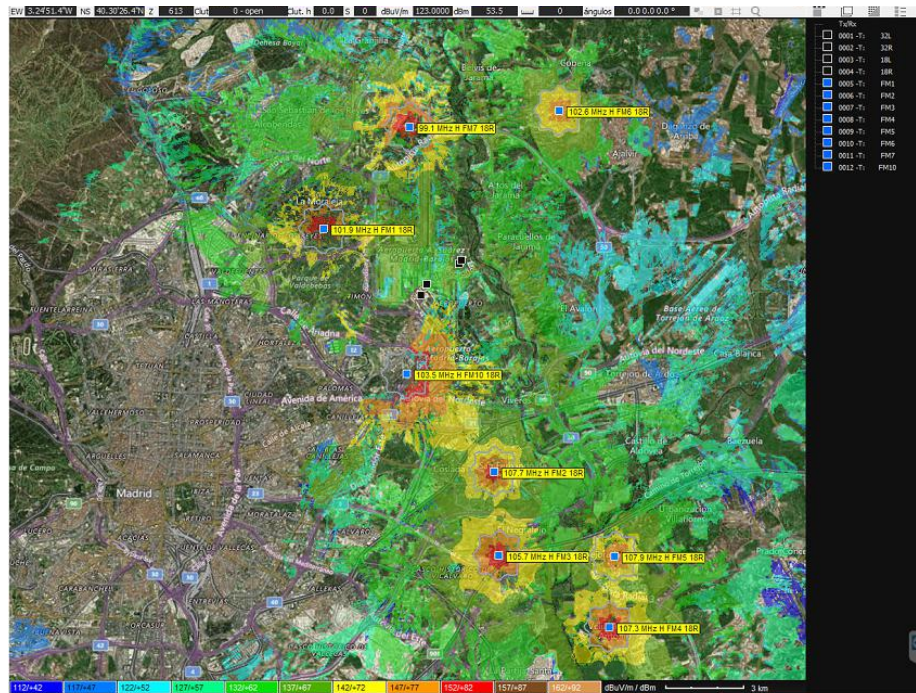


Figura 5-11. Estudio de cobertura de las antenas de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 1 MW

Una vez más, el resultado obtenido es similar al de los casos anteriores. El nivel de señal se ha incrementado en 10 dBm en cada zona y al generar los informes de interferencia de los localizadores ILS nos encontramos con que no se ven afectados por interferencias producidas por los sistemas de radio FM.

Como hemos podido comprobar, el sistema ILS del aeropuerto de Madrid es muy robusto frente a las interferencias producidas por los sistemas de radio FM. Pero debemos recordar que la red de estaciones emisoras de FM ha sido un ejemplo que hemos escogido. En el caso de modificar las características de estas estaciones, los resultados de los informes de interferencias obtenidos podrían ser diferentes.

## 5.4.2 Interferencias del Sistema VOR

Para obtener informes de interferencias del sistema VOR se va a proceder de la misma manera que en el apartado anterior. En primer lugar se muestran los emplazamientos de las distintas antenas emisoras de radio FM y de las antenas VOR. Los emplazamientos son mostrados en la figura 5-12.



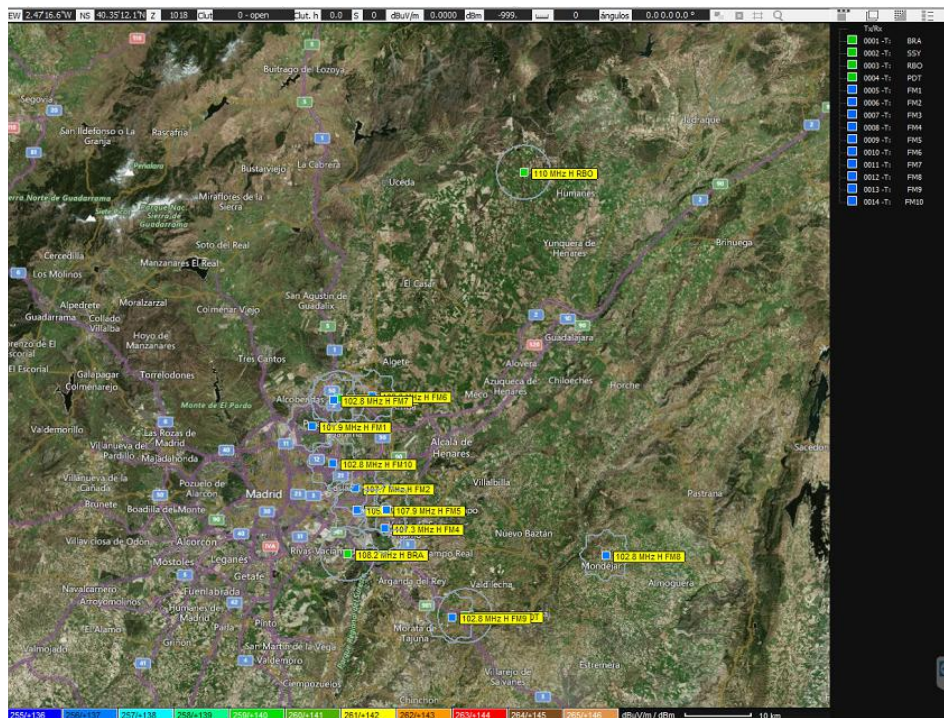


Figura 5-12. Emplazamientos de las antenas VOR y de las antenas emisoras de radio FM

A continuación, realizamos el estudio de cobertura de las antenas de radio FM utilizando las potencias de transmisión mostradas en la tabla 5-2. Este estudio de cobertura se puede ver en la figura 5-13. Los tonos rojos cubren aquellas zonas cuyo nivel de señal es aproximadamente 49 dBm. En color naranja se muestran aquellas zonas cuyo nivel de señal se encuentra en torno a 43 dBm. Las zonas cuyo nivel de señal es de 37 dBm se encuentran marcadas en color amarillo. En un color verde están coloreados aquellos puntos del mapa cuyo nivel de señal FM es de unos 31 dBm.



Figura 5-13. Estudio de cobertura de las antenas emisoras de radio FM para una potencia de transmisión del orden de KW



Posteriormente generamos los informes de interferencias para las distintas antenas VOR. Los resultados obtenidos son cuatro informes en blanco similares al mostrado en la figura 5-8. Esto significa que no se está produciendo interferencias en las antenas VOR.

Siguiendo el mismo procedimiento que utilizamos para los localizadores ILS, multiplicamos la potencia de emisión de las antenas FM por diez y realizamos un nuevo estudio de cobertura. El resultado obtenido se muestra en la figura 5-14. En esta figura podemos ver como las zonas cuyo nivel de señal está en torno a 64 dBm aparecen marcadas en color naranja. En amarillo aparecen coloreadas las zonas del mapa cuyo nivel de señal se sitúa en torno a 56 dBm. En color verde están coloreadas las zonas que tienen un nivel de señal de unos 48 dBm. En verde agua las zonas con un nivel de señal de 32 dBm. Por último en azul celeste se representan los puntos del mapa con un nivel de señal de unos 24 dBm.

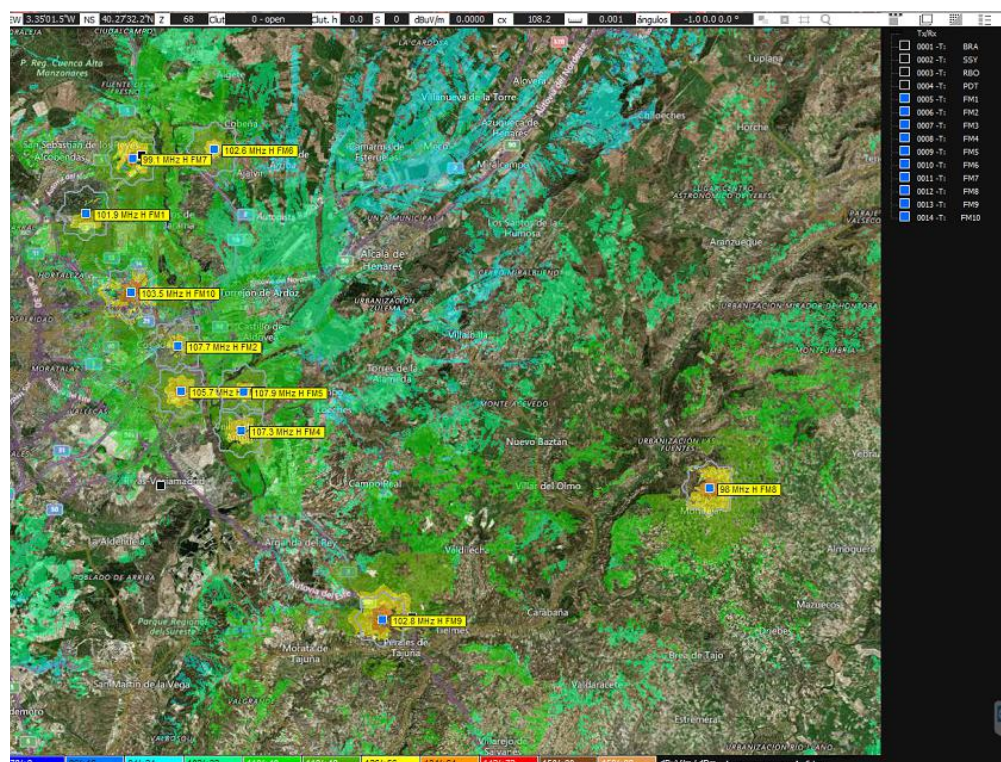


Figura 5-14. Estudio de cobertura de las antenas emisoras de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 10 KW

Tras la realización del estudio de cobertura, procedemos a la generación de los informes de interferencia de las antenas VOR. Al igual que en el caso anterior, obtenemos que en ninguna de las antenas VOR se están produciendo interferencias.

El siguiente paso es incrementar una vez más la potencia de transmisión de las antenas transmisoras de radio FM. Ahora tienen una potencia de emisión del orden de los 100 KW. Al realizar el estudio de cobertura obtenemos el resultado que se muestra en la figura 5-15. En esta figura podemos ver como las zonas cuyo nivel de señal está en torno a 67 dBm aparecen marcadas en color naranja. En amarillo aparecen coloreadas las zonas del mapa cuyo nivel de señal se sitúa en torno a 60 dBm. En color verde están coloreadas las zonas que tienen un nivel de señal de unos 53 dBm. En verde agua las zonas con un nivel de señal de 39 dBm. Por último en azul celeste se representan los puntos del mapa con un nivel de señal de unos 32 dBm.



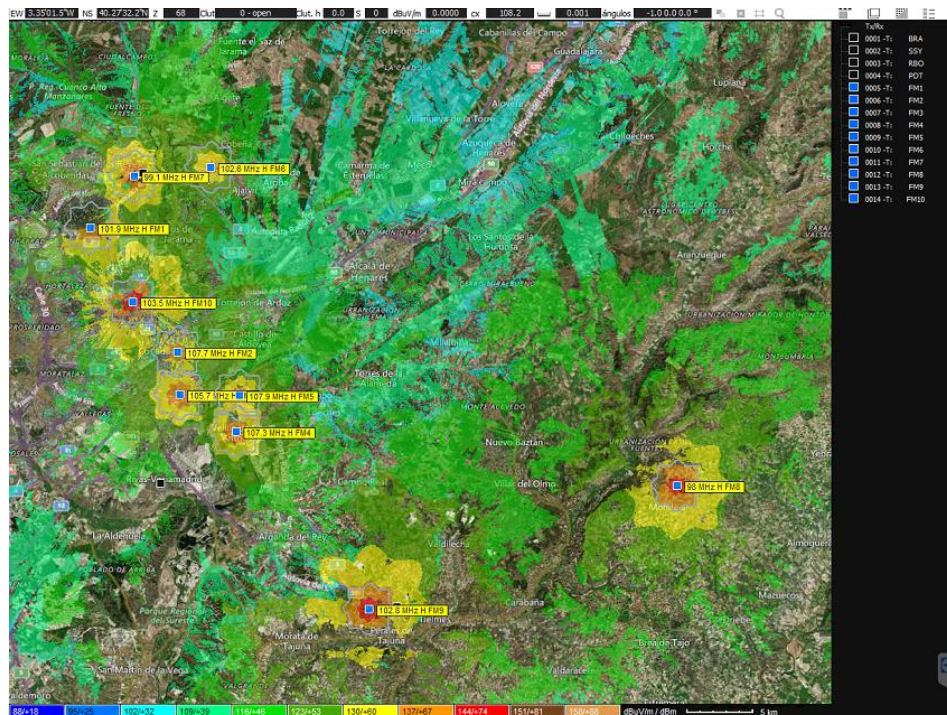


Figura 5-15. Estudio de cobertura de las antenas emisoras de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 100 KW

Volvemos a generar los informes de interferencias correspondientes a las distintas estaciones VOR del aeropuerto de Madrid. A pesar de que hemos incrementado la potencia de las estaciones emisoras de radio FM, volvemos a obtener los mismos informes que en el caso anterior, informes como el mostrado en la figura 5-8. No se están produciendo interferencias en ninguna de las estaciones VOR.

Para finalizar esta subapartado, aumentamos por última vez la potencia de transmisión de las estaciones emisoras de radio FM, llegando a estar esta potencia en el orden de los MW. El estudio de cobertura obtenido para este caso se muestra en la figura 5-16.

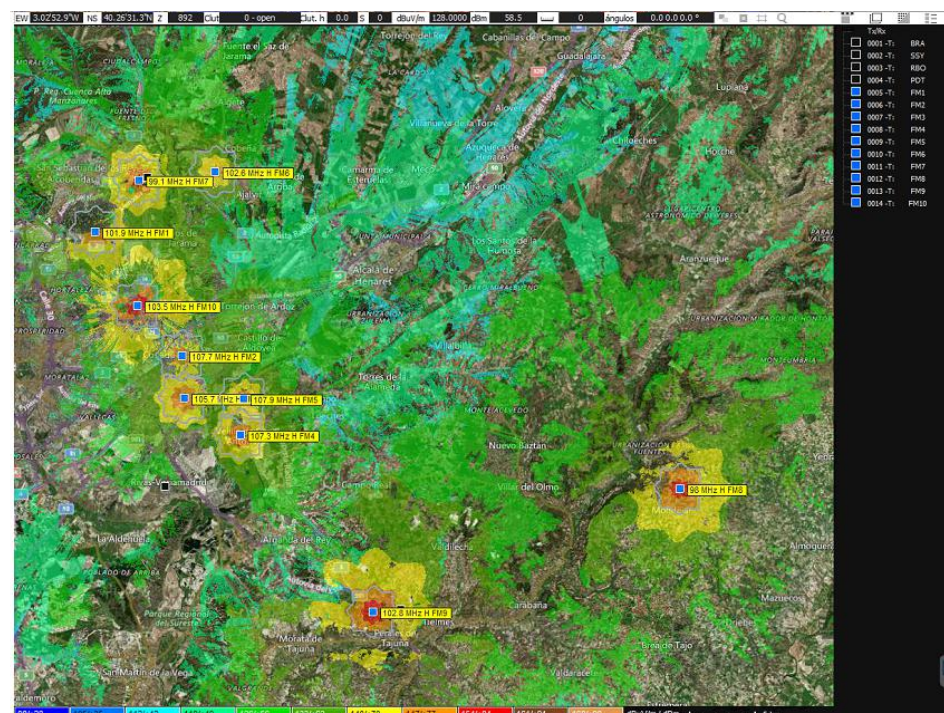


Figura 5-16. Estudio de cobertura de las antenas emisoras de radio FM para una potencia de transmisión del orden de 1 MW



En la figura 5-16 podemos ver como en color rojo aparecen marcados aquellos puntos cuyo nivel de señal está en torno a 84 dBm. Las zonas coloreadas en naranja tienen un nivel de señal de unos 77 dBm. En color verde se representan las zonas del mapa con 63 dBm. En un tono verdoso más claro aquellas que tienen un nivel de señal de 56 dBm. Y en verde agua los puntos con unos 49 dBm.

A continuación procedemos a generar los informes de interferencias y en este caso nos encontramos con una diferencia respecto a las situaciones anteriores. Para las antenas VOR de SSY, RBO y PDT obtenemos de nuevo informes en blanco, es decir, en estas antenas no se están produciendo interferencias. Sin embargo, el informe correspondiente al VOR BRA es diferente y se muestra en la figura 5-17.



Registro	Test point	Type	Result	Interference type	Wanted station #	Call sign	Wanted freq MHz	FTx 1 MHz	FTx 2 MHz	FTx 3 MHz	Fintermid MHz	Intermod produ	F51+correct.(dBu)	Correct factor 1 (dB)	F52+correct.(dBu)	Correct factor 2 (dB)	F53+correct.(dBu)	Correct factor 3 (dB)	ST1	ST
1	VOR	A2	-14...	ST 9-FS 113.0...	1	BRA	108.200000	107.90...	no	no	no	P2P	113.0	0.0					FM5	
2	VOR	B2	2.4	ST: 9...-17.6 dBm	1	BRA	108.200000	107.90...	no	no	no	P2P	113.0	0.0					FM5	

Figura 5-17. Informe de interferencias para el VOR BRA

Como se puede observar en la figura 5-17, en el VOR BRA se están produciendo interferencias de tipo A2 y B2 producidas por la estación FM5.

Por tanto, a partir de potencias de emisión de las antenas de FM del orden de los MW, el sistema VOR del aeropuerto de Madrid, deja de ser inmune a las interferencias causadas por las estaciones emisoras de radio FM.



# 6 COBERTURA RADAR

---

**D**etección y medición de distancias por radio (Radio Detection and Ranging). Se trata de un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles como aeronaves, barcos, vehículos motorizados, formaciones meteorológicas y el propio terreno. [34]

Su funcionamiento se basa en emitir un impulso de radio, que se refleja en el objetivo y se recibe típicamente en la misma posición del emisor. A partir de este “eco” se puede extraer gran información. El uso de ondas electromagnéticas con diversas longitudes de onda permite detectar objetos más allá del rango de otro tipo de emisiones (luz visible, sonido, etc.)

Entre sus ámbitos de aplicación se incluyen la meteorología, usos militares, y el control del tráfico terrestre y aéreo. En este trabajo nos vamos a centrar en este último uso, para conocer la posición de los aviones a lo largo de su trayectoria aérea

## 6.1 Clasificación de los sistemas Radar

Los radares se pueden clasificar en función de una serie de aspectos básicos.

### 6.1.1 Según el número de antenas

En función del número de antenas que tenga el sistema radar, éste se puede clasificar en:

- Monoestático: una única antena transmite y recibe
- Biestático: una antena transmite y otra recibe. Pueden estar en el mismo emplazamiento o en emplazamientos diferentes.
- Multiestático: combina la información recibida por varias antenas.

### 6.1.2 Según el blanco

Según el blanco, un sistema radar se puede clasificar en:

- Radar primario: funciona con independencia del blanco, dependiendo solamente de la sección radar equivalente o RCS del mismo
- Radar secundario: el radar interroga al blanco y éste responde normalmente con una serie de datos, como podría ser la altura del avión.

### 6.1.3 Según la forma de onda

En función de la forma de onda, un radar puede ser:

- Radar de onda continua (CW): transmite ininterrumpidamente. (Este tipo de radar es el utilizado por la policía para detectar las velocidades de los vehículos)
- Radar de onda continua con modulación (CW-FM, CW-PM): se le añade modulación de frecuencia o de fase a la señal con el objetivo de determinar cuando se transmitió la señal correspondiente a un eco. Permite estimar distancias.
- Radar de onda pulsada: Se transmite periódicamente un pulso, que puede estar o no modulado. Si aparecen ecos de pulsos anteriores al último transmitido, se interpretarán como pertenecientes a este último, de modo que aparecerán trazas de blancos inexistentes. Suele ser el funcionamiento habitual.

### 6.1.4 Según su finalidad

Dependiendo de la finalidad que tenga un radar, éste puede ser:

- Radar de seguimiento: su principal funcionalidad es seguir el movimiento de un blanco.
- Radar de búsqueda: explora todo el espacio, o un sector de él, mostrando todos los blancos que aparecen

Existen radares con capacidad de funcionar en ambos modos.

### 6.1.5 Según su frecuencia de trabajo

La tabla 6-1 recoge las diferentes bandas de frecuencia reconocidas actualmente.

Tabla 6–1. Bandas de frecuencia

Nombre de la banda	Frecuencias	Longitudes de onda	Observaciones
HF	3-30 MHz	10-100 m	Radares de vigilancia costera, vigilancia OTH
P	< 300 MHz	1 m+	'P' de "previo", aplicado de forma retrospectiva a los sistemas radar primitivos
VHF	50-330 MHz	0.9-6 m	Vigilancia a distancias muy elevadas, penetración en el terreno
UHF	300-1000 MHz	0.3-1 m	Vigilancia a distancias muy elevadas (ej: detección de misiles), penetración en el terreno y a través de la vegetación
L	1-2 GHz	15-30 cm	Distancias elevadas, control de tráfico en ruta
S	2-4 GHz	7.5-15 cm	Vigilancia a distancias intermedias. Control de tráfico en terminales. Condiciones meteorológicas a largas distancias
C	4-8 GHz	3.75-7.5 cm	Seguimiento a distancias elevadas. Meteorología
X	8-12 GHz	2.5-3.75 cm	Guía de misiles, meteorología, cartografía de resolución media, radares de superficie aeroportuarios. Seguimiento a distancias cortas
Ku	12-18 GHz	1.67-2.5 cm	Cartografía de alta resolución. Altimetros para satélites
K	18-27 GHz	1.11-1.67 cm	Absorción del vapor de agua. Se usa para meteorología,

			para detectar nubes. También para control de velocidad de motoristas.
Ka	27-40 GHz	0.75-1.11 cm	Cartografía de muy alta resolución. Vigilancia de aeropuertos. Usado para accionar cámaras para fotografiar matrículas de coches infractores
Q	40-60 GHz	7.5 mm - 5 mm	Comunicaciones militares
V	50-75 GHz	6.0-4 mm	Absorbido por la atmósfera
E	60-90 GHz	6.0-3.33 mm	Guía de ondas
W	75-110 GHz	2.7 - 4.0 mm	Se usa como sensor para vehículos autónomos experimentales, meteorología de alta resolución y tratamiento de imágenes.

### 6.1.6 Según su ámbito de aplicación

Según la finalidad con la que se vaya a utilizar el sistema radar, se puede clasificar en:

- Militar: radares de detección terrestre, radares de misiles autodirectivos, radares de artillería, radares de satélites para la observación de la Tierra.
- Aeronáutico: control de tráfico aéreo, guía de aproximación al aeropuerto, radares de navegación.
- Marítimo: radar de navegación, radar anti-colisión.
- Meteorológico: detección de precipitaciones (lluvia, nieve, granizo, etc.)
- Circulación y seguridad en ruta: control de velocidad de automóviles, radares de asistencia de frenado de urgencia (ACC)
- Científico: en satélites para la observación de la Tierra, para ver el nivel de los océanos, encontrar restos arqueológicos, etc.

### 6.1.7 Otras tecnologías

En la actualidad, también existen radares que emplean otras tecnologías.

- Radar tridimensional: es capaz de determinar la altura del blanco, además de su posición sobre el plano.
- Radar de imágenes laterales o radar de apertura sintética (SAR): permite la obtención de imágenes del terreno similares a fotografías. Funcionan combinando observaciones de un radar con una antena pequeña con complejos algoritmos matemáticos, creando artificialmente la sensación de tener una sola muestra hecha por una antena muy grande.
- Radares que operan utilizando la tecnología Ultra Wideband: pueden detectar un humano a través de paredes. Esto se hace posible gracias a que las características reflectivas de los humanos son generalmente mayores que las de los materiales utilizados en la construcción. Sin embargo, como los humanos reflejan mucho menos que el metal, estos sistemas requieren tecnología sofisticada para aislar a los objetivos humanos y luego construir una imagen detallada.

## 6.2 Principios de funcionamiento

### 6.2.1 Reflexión

Las ondas electromagnéticas se dispersan cuando hay cambios significativos en las constantes dieléctricas o diamagnéticas. Esto significa que un objetivo sólido en el vacío o en el aire (es decir, un cambio en la densidad atómica entre el objeto y su entorno) producirá dispersión de las ondas de radio, como las del radar. Esto ocurre particularmente en el caso de los materiales conductores como el metal y la fibra de carbono, lo que hace que el radar sea especialmente indicado para la detección de aeronaves. En ocasiones, los aviones militares utilizan materiales con sustancias resistivas y magnéticas que absorben las ondas del radar, reduciendo así el nivel de reflexión.

La reflexión de las ondas del radar varía en función de su longitud de onda y de la forma del blanco. Si la longitud de onda es mucho menor que el tamaño del blanco, la onda rebotará del mismo modo que la luz contra un espejo. Si por el contrario es mucho más grande que el tamaño del blanco, lo que ocurre es que este se polariza (separación física de las cargas positivas y negativas) como un dipolo. Cuando las dos escalas son similares pueden darse efectos de resonancia. Los radares actuales emplean longitudes de onda pequeñas (de poco cms o inferiores) que permiten detectar objetos del tamaño de una barra de pan.

Las señales de radio de onda corta (3 kHz - 30 MHz) se reflejan en las curvas y aristas, del mismo modo que la luz produce destellos en un trozo de cristal curvo. Para estas longitudes de onda los objetos que más reflejan son aquellos con ángulos de 90° entre las superficies reflectivas. Una estructura que conste de tres superficies que se juntan en una esquina (como la de una caja) siempre reflejará hacia el emisor aquellas ondas que entren por su abertura.

Este tipo de reflectores, denominados reflectores de esquina se suelen usar para hacer "visibles" al radar objetos que en otras circunstancias no lo serían (se suelen instalar en barcos para mejorar su detectabilidad y evitar choques). Siguiendo el mismo razonamiento, si se desea que una nave no sea detectada, en su diseño se procurará eliminar estas esquinas interiores, así como superficies y bordes perpendiculares a las posibles direcciones de detección. De ahí el aspecto extraño de los aviones "stealth" (avión furtivo). Todas estas medidas no eliminan por completo la reflexión debido a la difracción, especialmente para longitudes de onda grandes. Otra contramedida habitual es arrojar cables y tiras metálicas cuyo largo es media longitud de onda con la idea de cegar al radar; son efectivas, si bien la dirección hacia la que se reflejan las ondas es aleatoria cuando lo óptimo sería dirigir la reflexión hacia el radar que se quiere evitar. El factor que da la medida de cuánto refleja un objeto las ondas de radio se llama Sección Transversal de Radar o RCS (Radar Cross-Section).

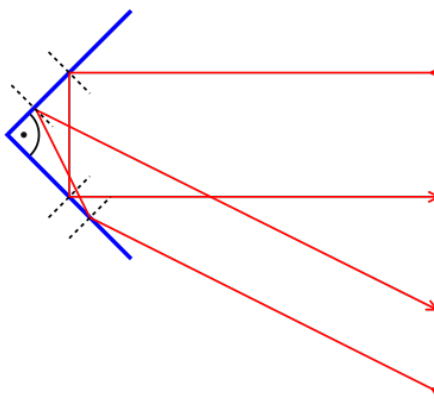


Figura 6-1. Reflector de esquina

### 6.2.2 Ecuación Radar

Mediante la ecuación radar, podemos calcular la potencia reflejada ( $P_r$ ) a la antena de recepción

$$P_r = \frac{P_t * G_t * A_r * \sigma * F^4}{(4\pi)^2 * R_t^2 * R_r^2} \quad (8)$$

donde

$P_t$  = potencia transmitida

$G_t$  = ganancia de la antena transmisora

$A_r$  = apertura efectiva (área) de la antena de recepción

$\sigma$  = sección transversal radar (RCS)

$F$  = factor de propagación del patrón

$R_t$  = distancia del transmisor al objetivo

$R_r$  = distancia del objetivo al receptor

En el caso común donde el transmisor y el receptor se encuentran en el mismo lugar ( $R_r = R_t$ ) y además si consideramos  $F=1$ , la ecuación anterior puede simplificarse:

$$P_r = \frac{P_t * G_t * A_r * \sigma}{(4\pi)^2 * R^4} \quad (9)$$

donde  $R$  es la distancia.

Esto significa que la potencia en el receptor se reduce proporcionalmente a la cuarta potencia de la distancia, lo que implica que la potencia reflejada desde el objetivo distante es muy pequeña.

$F = 1$  es una simplificación para el vacío sin interferencia. El factor de propagación engloba los efectos de la propagación multicamino y del shadowing, y depende del entorno en el que se esté propagando las ondas. Es una situación real de los efectos de atenuación en el recorrido deben ser considerados.

### 6.2.3 Polarización

El campo eléctrico de la señal que emite un radar es perpendicular a la dirección de propagación. La dirección de dicho campo determina la polarización de la onda. Los radares usan polarizaciones horizontales, verticales, lineales o circulares en función de la aplicación. La polarización aleatoria es adecuada para detectar superficies irregulares como rocas y se usa en radares de navegación

### 6.2.4 Centelleo

Es una fluctuación en la amplitud de un objetivo sobre la pantalla de un radar. Está estrechamente relacionado con el destello objetivo, un desplazamiento evidente del objetivo de su posición.

### 6.2.5 Interferencias

Los sistemas radar deben hacer frente a la presencia de diferentes tipos de señales indeseadas y conseguir centrarse en el blanco que realmente interesa. Dichas señales espurias pueden tener su origen en fuentes tanto internas como externas y pueden ser de naturaleza pasiva o activa. La capacidad del sistema radar de sobreponerse a la presencia de estas señales define su relación señal/ruido (SNR). Cuanto mayor sea la SNR del sistema, mejor podrá aislar los objetivos reales de las señales de ruido del entorno.

Este efecto puede ser causado por un cambio del punto de reflexión eficaz sobre el objetivo, pero también tiene otras causas. Las fluctuaciones pueden ser lentas (exploración a exploración) o rápidas (pulso a pulso).

El centelleo y el destello son en realidad dos manifestaciones del mismo fenómeno.

### 6.2.6 Ruido

Los sistemas radar deben hacer frente a la presencia de diferentes tipos de señales indeseadas y conseguir centrarse en el blanco que realmente interesa. Dichas señales espurias pueden tener su origen en fuentes tanto internas como externas y pueden ser de naturaleza pasiva o activa. La capacidad del sistema radar de sobreponerse a la presencia de estas señales define su SNR. Cuanto mayor sea la SNR del sistema, tanto mejor podrá aislar los objetivos reales de las señales de ruido del entorno.

Este efecto puede ser causado por un cambio del punto de reflexión eficaz sobre el objetivo, pero también tiene otras causas. Las fluctuaciones pueden ser lentas (exploración a exploración) o rápidas (pulso a pulso).

El centelleo y el destello son en realidad dos manifestaciones del mismo fenómeno.

### 6.2.7 Clutter

Hace referencia a todos aquellos ecos (señales de RF) recibidos por el radar que son, por definición, no deseados. Pueden estar causados por objetos del entorno, el mar, precipitaciones, tormentas de arena, animales (especialmente pájaros), turbulencias atmosféricas y otros efectos atmosféricos como reflexiones ionosféricas y estelas de meteoritos. También puede haber clutter debido a objetos fabricados por el hombre, sin intención de engañar al radar (edificios) o con ella ("chaffs").

Algunas veces el clutter está causado por una longitud excesiva de la guía de onda que conecta el transceptor del radar y la antena. En un radar de tipo Indicador de Posición o PPI (Plan Position Indication) (representación de distancia en función del azimut) con antena giratoria, este clutter se verá como un destello en el centro de la pantalla. En este caso el receptor estaría interpretando ecos de partículas de polvo y señales de RF indeseadas que vagan por la guía de onda. Este tipo de clutter se reduce reajustando el lapso entre el envío del pulso por parte del transmisor y el instante en que se activa la etapa de recepción. La explicación para esto es que la mayor parte de estos brillos están causados por el propio pulso transmitido antes de abandonar la antena.

Se puede dar la circunstancia de que una determinada fuente de clutter sea indeseable para una aplicación radar (ej: nubarrones en un radar de defensa aérea) pero positiva para otra (meteorológica). El clutter es considerado una fuente pasiva de interferencias, ya que sólo aparece como respuesta a los pulsos enviados por el radar.

Hay bastantes métodos para detectar y neutralizar el clutter. Muchos de ellos se fundamentan en el principio de que el clutter apenas varía entre diferentes barridos del radar. Por tanto, al comparar barridos consecutivos se comprobará que el blanco real se mueve, mientras que los ecos de clutter son estacionarios. El clutter marítimo se puede reducir empleando polarización horizontal, mientras que el de la lluvia se reduce con polarizaciones circulares (nótese que los radares meteorológicos utilizan polarización lineal porque lo que les interesa es precisamente detectar la lluvia). Otros métodos se centran en aumentar la relación señal/clutter.

El método de Tasa Constante de Falsas Alarmas o CFAR (Constant False Alarms Rate) es otra técnica basada en el hecho de que los ecos debidos al clutter son mucho más numerosos que los ecos producidos por objetivos de interés. Este método permite mantener un valor constante de la probabilidad de falsa alarma haciendo un promediado adaptativo del nivel real de ruido y ajustando automáticamente la ganancia del receptor. Si bien esto no ayuda cuando el blanco está rodeado por clutter muy fuerte, puede permitir identificar objetivos más o menos claros. En radares actuales este proceso está controlado por software. Es beneficioso en sistemas en los que sea crítico mantener una determinada probabilidad de falsa alarma.

Finalmente, también hay clutter originado por la multitrayectoria de la señal de eco de un objetivo válido. Los factores que pueden causar estos caminos múltiples son la reflexión terrestre y las refracciones atmosférica e ionosférica. Este clutter es especialmente molesto, ya que parece moverse y se comporta como si fuera un blanco de interés real, de modo que el radar detecta un objetivo "fantasma" que en realidad no existe. En un escenario típico, un blanco fantasma causado por reflexión terrestre sería interpretado por el radar como un objetivo idéntico al real situado justo por debajo de este. El radar puede intentar unificar los objetivos considerando que el blanco fantasma está a una altura incorrecta o directamente eliminarlo por considerar que está causado por jitter o que su ubicación es físicamente imposible. Una buena opción para minimizar el impacto de este efecto es incorporar al radar un mapa topográfico de los alrededores que ayude a eliminar



aquellos ecos que se detecten a alturas imposibles (por debajo del nivel del suelo o por encima de una determinada altura). En radares de control de tráfico aéreo actuales se emplean algoritmos para identificar blancos falsos comparando los ecos recibidos con otros adyacentes y calculando la probabilidad de que sea real sobre la base de datos de altura, distancia y tiempo.

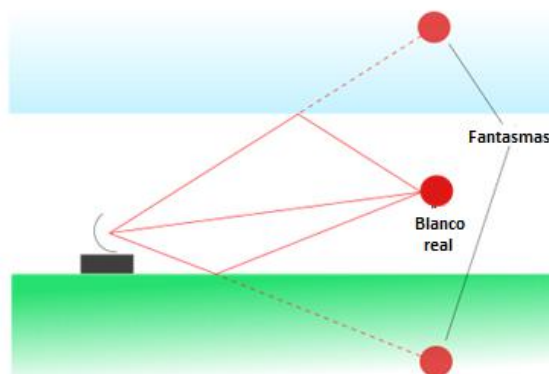


Figura 6-2. El multitrayecto de la señal hace que el radar detecte blancos falsos

### 6.2.8 Jamming

Se conoce como jamming a aquellas señales externas al sistema radar emitidas en las frecuencias de funcionamiento del mismo y que por tanto enmascaran los objetivos de interés. Puede ser intencionado para funcionar como contramedida electrónica fortuita (por ejemplo, fuerzas amigas cuyos sistemas de comunicaciones usan la misma banda). El jamming está considerado como una fuente activa de interferencias, ya que está originado fuera del sistema radar y en general se trata de señales sin relación alguna con este.

El jamming es muy problemático para los radares, pues suele tratarse de señales de mayor potencia que los ecos de interés (hay que tener en cuenta que la señal de interés recorre un camino de ida y vuelta radar-objetivo-radar, mientras que la señal interferente realiza solo un camino de ida). Las fuentes de jamming intencionado pueden por tanto ser efectivas emitiendo con mucha menos potencia que los radares que quieren confundir. La interferencia puede llegar al radar a través de la línea de visión directa ("Mainlobe Jamming" o "jamming de lóbulo principal") o por otros caminos ("Sidelobe Jamming" o "jamming de lóbulos secundarios o laterales").

La única manera de reducir el jamming de lóbulo principal es disminuir el ángulo sólido de dicho lóbulo. Un jamming de lóbulo principal a la misma frecuencia y con la misma polarización que el radar no se puede eliminar completamente. El efecto del jamming de lóbulo lateral se puede atenuar reduciendo los lóbulos laterales del diagrama de radiación de la antena durante la fase de diseño de la misma. Una manera de conseguir esto es emplear arrays de tipo thinned o sparse. El uso de antenas omnidireccionales puede ayudar a identificar e ignorar señales que entran por los lóbulos secundarios. Otras técnicas anti-jamming son el frequency hopping o el uso de una determinada polarización, ya que si la polarización del jamming es diferente a la de la antena su efecto se ve muy reducido.

## 6.3 Procesado de una señal en un Sistema Radar

### 6.3.1 Tiempo de tránsito

Una forma de medir la distancia entre el radar y un objeto es transmitir un pequeño pulso electromagnético y medir el tiempo que tarda el eco en volver. La distancia será:

$$r = \frac{c * t}{2} \quad (10)$$

$r$  = distancia estimada

$c$  = velocidad de la luz

$t$  = tiempo de tránsito

Una estimación precisa de la distancia exige una electrónica de elevado rendimiento. La mayor parte los radares usan la misma antena para enviar y recibir, separando la circuitería de transmisión y recepción mediante un circulador o duplexor. Por ello, mientras se está transmitiendo el pulso no se puede recibir ningún eco. Esto determina la llamada "distancia ciega" del radar, por debajo de la cual éste es inútil. Esta distancia viene dada por la ecuación 11.

$$r_{\text{BLIND}} = \frac{c * \tau}{2} \quad (11)$$

$r_{\text{BLIND}}$  = distancia ciega

$c$  = velocidad de la luz

$\tau$  = tiempo que se tarda en transmitir un pulso

Si se quiere detectar objetos más cercanos hay que transmitir pulsos más cortos. Del mismo modo, a un rango de detección máximo: distancia máxima sin ambigüedad. Si el eco llega cuando se está mandando el siguiente pulso, el receptor no podrá distinguirlo. Para maximizar el rango hay que aumentar el tiempo entre pulsos

$$r_{\text{UNAMB}} = \frac{c * T}{2} \quad (12)$$

$r_{\text{UNAMB}}$  = distancia máxima sin ambigüedad

$c$  = velocidad de la luz

$T$  = Tiempo entre dos pulsos

Hay un compromiso entre estos dos factores, siendo difícil combinar detección a corta y a larga distancia: para detectar a corta distancia hay que hacer los pulsos más cortos, lo que implica menor potencia, lo que implica ecos más débiles y por tanto menor alcance. Se puede aumentar la probabilidad de detección mandando pulsos con mayor frecuencia, pero nuevamente, esto acorta la distancia máxima sin ambigüedad. La combinación de  $T$  y  $\tau$  que se elija se llama "patrón de pulsos" del radar. En la actualidad los radares pueden muchas veces cambiar su patrón de pulsos de forma electrónica, ajustando dinámicamente su rango de funcionamiento. Los más modernos funcionan disparando en el mismo ciclo dos pulsos diferentes, uno para detección a larga distancia y otro para distancias cortas.

La resolución en distancia y las características de la señal recibida en comparación con el ruido dependen también de la forma del pulso. A menudo este se modula para mejorar su rendimiento gracias a una técnica conocida como "compresión de pulsos".

### 6.3.2 Modulación en frecuencia

Otra forma de estimar distancias en un radar se basa en la modulación en frecuencia. La comparación de la frecuencia de señales es por norma más precisa y sencilla que la comparación de tiempos. Por eso, lo que se hace es emitir una señal (una senoide) a una frecuencia que va variando de forma constante en el tiempo, de modo que cuando llega el eco, su frecuencia será diferente de la de la señal original; comparándolas se puede saber cuánto tiempo ha transcurrido y por tanto cuánta distancia hay hasta el blanco. A mayor desvío en frecuencia mayor distancia.

Esta técnica puede emplearse en radares de onda continua (en lugar de a pulsos se transmite todo el tiempo) y

a menudo se encuentra en altímetros a bordo de aviones. La comparación en frecuencias es similar que la que se usa para medir velocidades.

## 6.4 Cobertura Radar en el aeropuerto Madrid-Barajas

### 6.4.1 Estudios teóricos

Se puede utilizar ICS Telecom para la optimización de las ubicaciones del radar, dependiendo de la altura del blanco y del área de detección. A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la utilización de dicha herramienta en la superficie ocupada por el aeropuerto de Madrid. [19]

La figura 6-3 representa el área seleccionada para realizar la simulación de la optimización de la ubicación del radar en el aeropuerto de Madrid. El polígono color fucsia cubre toda la superficie ocupada por el aeropuerto de Barajas.

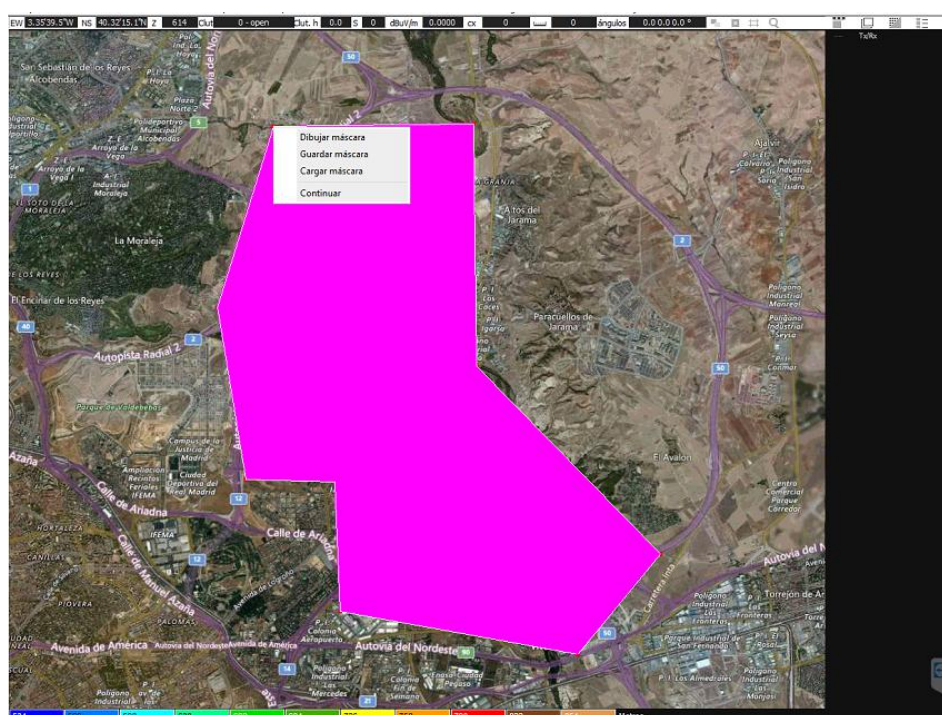


Figura 6-3. Área seleccionada mediante la herramienta ICS para realizar la simulación de cobertura radar

Se ha configurado ICS Telecom para detectar una entidad a 500 m sobre el nivel del suelo, con un radar ubicado a 30 m sobre el nivel del suelo. Se utilizarán 25 puntos de prueba para buscar en estos lugares. Las posiciones de radar potencial también se encierran en el polígono dibujado.

Las figuras 6-4 y 6-5 muestran mapas porcentuales de los objetivos detectables: si el usuario establece un radar de 30 m de altura en una ubicación que da un porcentaje del 85%, significa que este radar detectará el 85 % de blancos de 500 m de altura dentro del polígono.

Para la figura 6-4 está configurada para detectar blancos a 1.000 m de altura y se ha obtenido que en todo el área seleccionada se detectarán el 100% de los blancos.

Por otro lado, para obtener la figura 6-5 se han configurado la herramienta para detectar blancos a 500 m. Tras observar el resultado obtenido podemos decir que en todo el área marcada se detectarán el 97% de los blancos que estén a dicha altura.



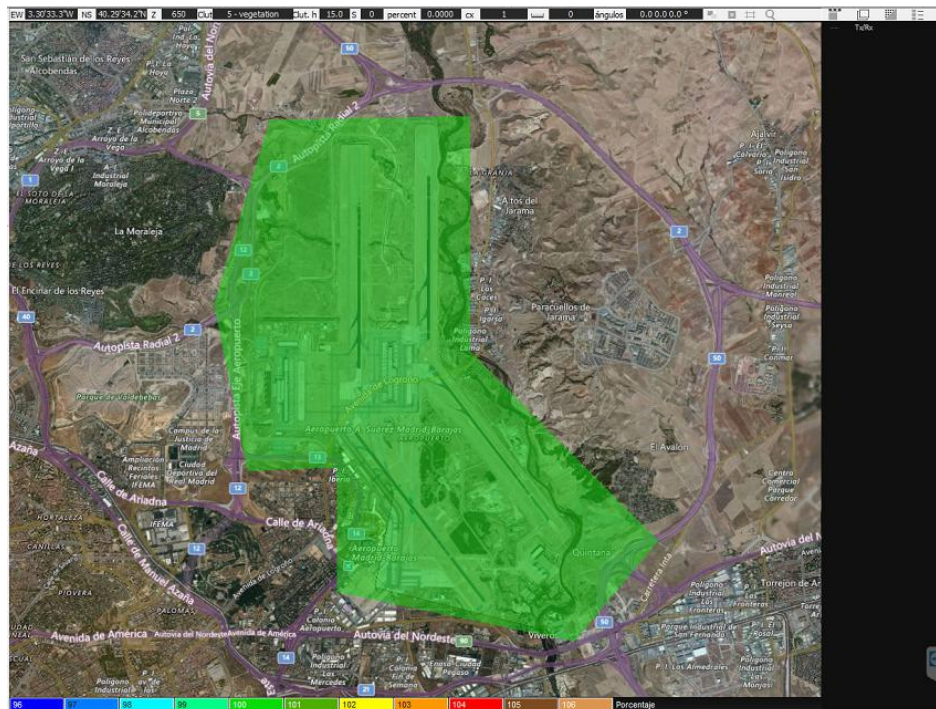


Figura 6-4. Simulación de detección radar de blancos a 1.000m de altura

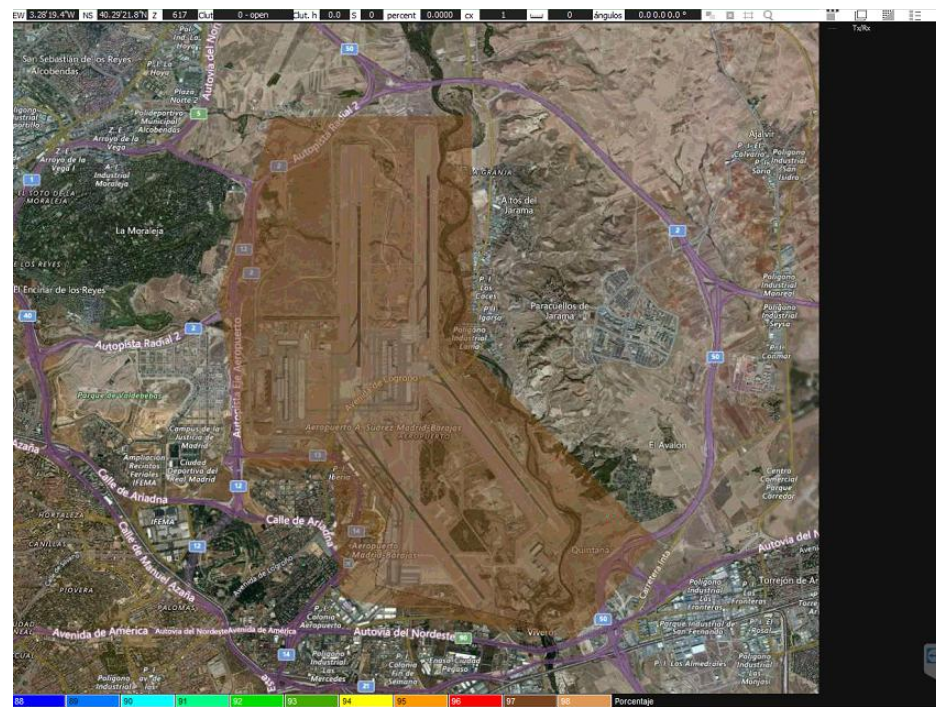


Figura 6-5. Simulación de detección radar de blancos a 500m de altura

ICS Telecom permite filtrar los porcentajes más altos en los mapas porcentuales obtenidos, para resaltar los mejores lugares donde colocar los radares.

En la figura 6-6 se muestra el resultado obtenido tras filtrar los resultados de la figura 6-5. Se obtiene que para un porcentaje en el intervalo 90% - 100% el área cubierta es de 46,62 Km<sup>2</sup>.

Figura 6-6. Filtrado de mapa porcentual

#### 6.4.2 Simulaciones para el cálculo de cobertura radar

Los estudios realizados en el subapartado anterior, eran simplemente análisis teóricos que permite realizar el software ICS Telecom para ayudar a los diseñadores de redes a realizar su trabajo.

En este subapartado vamos a analizar el funcionamiento de varios radares situados en el aeropuerto de Madrid.

Para ello, vamos a insertar varios transmisores radar en las inmediaciones del aeropuerto para realizar varios estudios de cobertura. En la figura 6-7 se muestran los emplazamientos elegidos para colocar los radares.



Figura 6-7. Emplazamientos elegidos para colocar los radares



A continuación pasamos a configurar los distintos parámetros de las antenas radar. En la figura 6-8 podemos observar el valor dado a cada uno de ellos. La altura de las antenas radar serán de 30 m, la potencia de pico 250 KW y la ganancia de las antenas 30 dB. El patrón de radiación será calculado en uno de los siguientes pasos

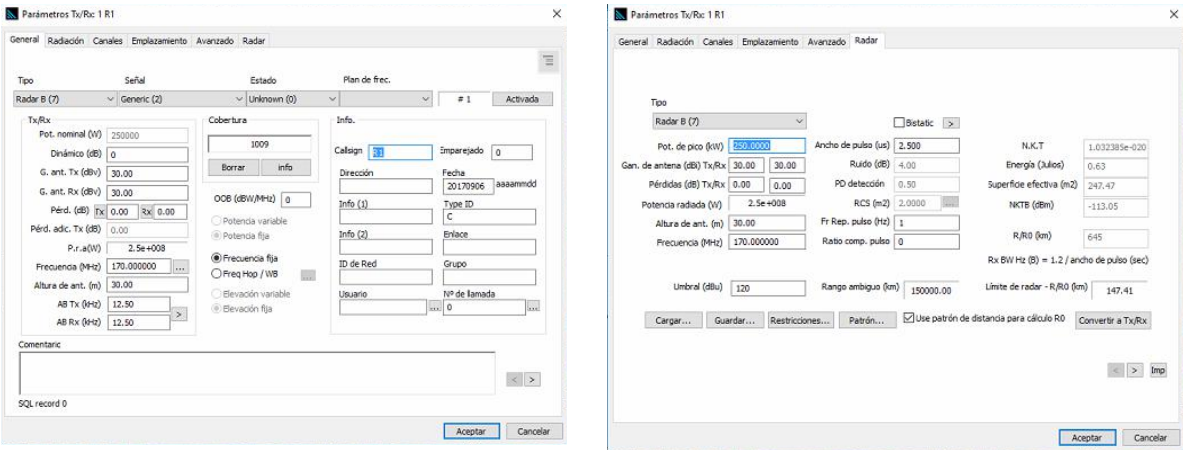


Figura 6-8. Configuración de los parámetros de las antenas radar

La frecuencia de cada una de las antenas, se muestra en la tabla 6-2.

Tabla 6–2. Asignación de frecuencias

Antena	Frecuencia
R1	170,00 MHz
R2	171,00 MHz
R3	172,00 MHz
R4	173,00 MHz
R5	174,00 MHz
R6	175,00 MHz

Una de las características más importante del radar es su alcance máximo de cobertura o límite radar, expresado por R/R0 en Km. Este rango se utiliza para el cálculo de cobertura radar. El límite radar puede ser expresado de dos formas distintas:

- Definiendo todos los parámetros (potencia pico, tiempo del pulso, ruido...) y luego calcular el límite radar
- Definiendo un patrón de elevación.

La tabla 6-3 recoge todos los parámetros necesarios para calcular el rango radar.

Tabla 6-3. Parámetros para calcular el rango radar

Parámetro	Significado	Unidad de medida	Fórmula
$G$	Ganancia total del radar	dB	$\frac{(TxGain + RxGain)}{2}$
$F$	Frecuencia	MHz	Dato
$DPD$	Probabilidad de detección (desde 0,5 hasta 0,99)	%	Dato
$RL$	Pérdidas totales del radar	dB	$\frac{(Pérdidas Tx + Pérdidas Rx)}{2}$
$RCS$	Superficie equivalente del blanco	m <sup>2</sup>	Dato
$noise$	Factor de ruido	dB	Dato
$N$	Factor de ruido		$10^{\frac{noise}{10}}$
$B$	Ancho de Banda Rx	Hz	$\frac{1,2}{Pulse}$
$K$	Boltzmann constant		
$T$	Temperatura	°K	
$Pulse$	Tiempo del pulso	s	Dato
$P$	Potencia pico	W	Dato
$L$	Longitud de onda	m	$\frac{300}{F}$
$Thermal\ noise$	KTBF	dBm	$10 \log(N * K * T * B * 1000)$
$S$	Superficie equivalente de la antena radar	m <sup>2</sup>	$\frac{10^{\frac{G}{10}} * L^2}{4 * \pi}$
$LO$	Pérdidas totales		$10^{\frac{RL}{10}}$
$E$	Energía radiada	J	$P * Pulse$

R/R0 se calcular utilizando la ecuación 13

$$R/R0 = 0,03 * \left( \frac{E * LO * RCS}{N * K * T * \frac{1}{LO}} \right)^{\frac{1}{4}} * \sqrt{S * F} * (1 - DPD) \quad (13)$$

A los 6 radares colocados en el mapa les vamos a poner el patrón de R0 mostrado en la figura 6-9. Para ello sólo debemos marcar la casilla “Usar Patrón de distancia para el cálculo de R0” que aparece en parte inferior de la figura 6-8. Al activar esta casilla automáticamente se nos abrirá la ventana mostrada en la figura 6-9.

Figura 6-9. Patrón de R0

La ventana de patrón de elevación (figura 6-9) es una calculadora que permite a ICS Telecom extraer el límite teórico máximo (R0) por ángulo vertical. Para cada ángulo vertical, el límite debe ser definido en Km o millas (columna km/M). Esta ventana es sólo una calculadora que permite al software extraer el límite teórico máximo (R/R0) y convertir los valores límite en atenuaciones en la ficha Patrón del mismo cuadro de parámetros (utilizado para el cálculo). Los valores introducidos aquí no se pueden guardar. Al configurar esta patrón de elevación, ICS Telecom calcula automáticamente el patrón de radiación de las antenas. El patrón de radiación obtenido se muestra en la figura 6-10.

Figura 6-10. Patrón de radiación de los radares

En la figura 6-11 podemos ver el resultado obtenido tras realizar una simulación de cobertura radar. Como se puede comprobar, tras colocar los 6 radares en las inmediaciones del aeropuerto de Barajas, conseguimos un



buen nivel de señal en toda la superficie del aeropuerto. El color rojo marca aquellas zonas en las que el nivel de señal es de 33 dBm. Las zonas cubiertas en color naranja tienen un nivel de señal radar de 29 dBm. El color amarillo representa un nivel de señal igual a 27 dBm. Y finalmente las zonas verdosas, son aquellos puntos del mapa en los que el nivel de señal es igual a unos 21 dBm.

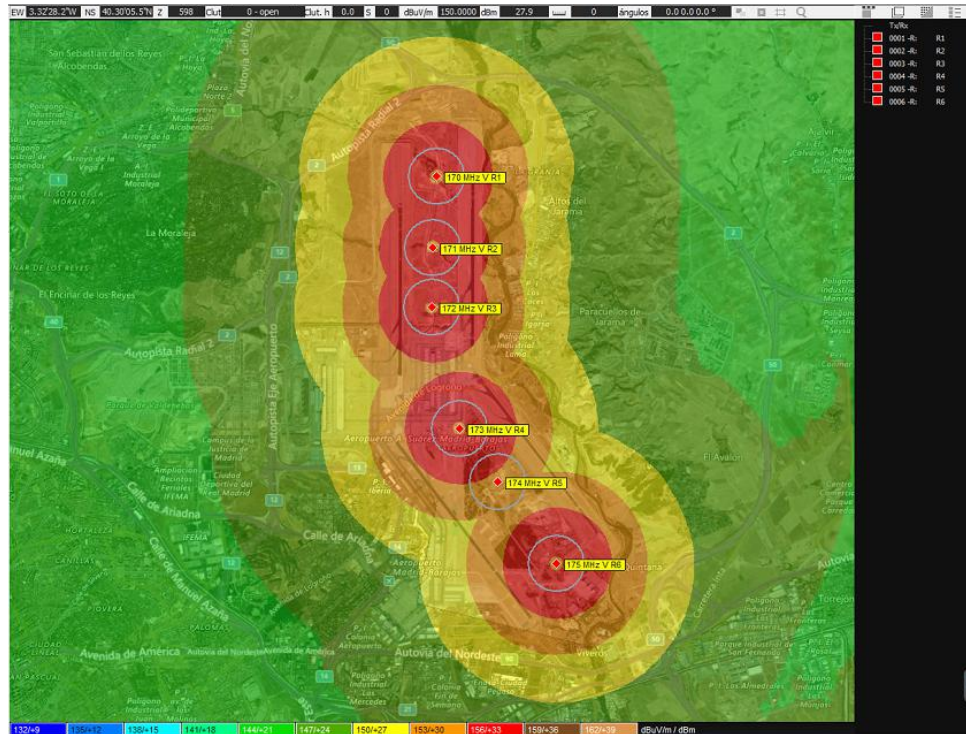


Figura 6-11. Estudio de cobertura radar.

Si hacemos zoom sobre los resultados obtenidos, podemos ver las imágenes mostradas en la figura 6-12.

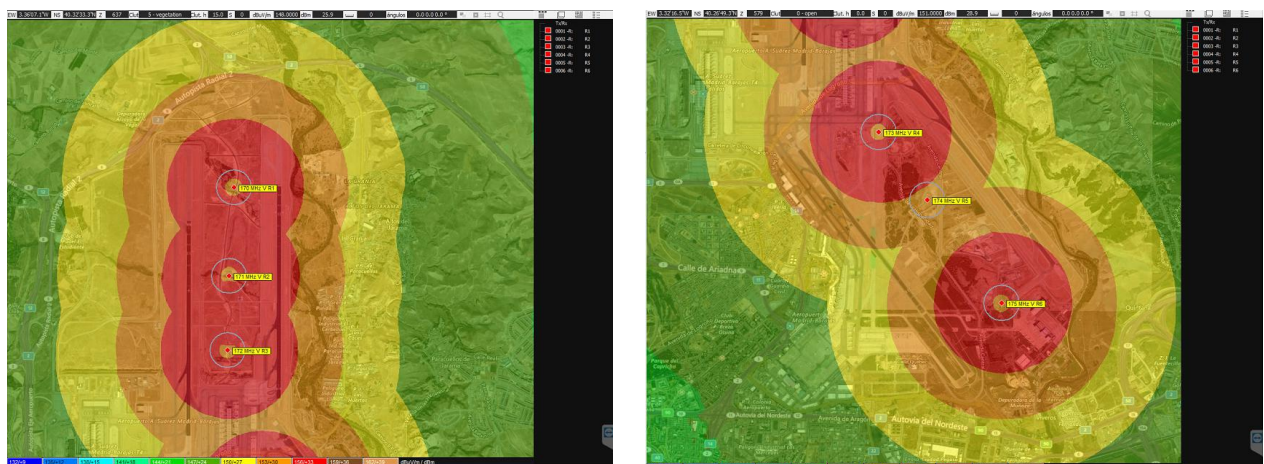


Figura 6-12. Estudio de cobertura radar en detalle

Seguidamente, vamos a representar en un mapa las distintas alturas a las que seremos capaces de identificar las aeronaves que se van aproximando al aeropuerto. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6-13. Según el código de colores, el azul oscuro representa todas aquellas zonas en las cuales se puede detectar a un blanco situado a una altura de 1 m. Las zonas cubiertas en un tono azul un poco más claro se pueden identificar objetivos y aeronaves que se encuentren a una altura de 11m. El color azul turquesa representa

aquellos puntos del mapa en los cuales se pueden identificar blancos a 21 m de altura. Los tonos verdosos muestran aquellas zonas en las que podemos detectar objetivos a unos 50 m de altura. Y finalmente, los tonos amarillos y naranjan representan las zonas en las que podemos detectar aeronaves a mayores alturas, unos 70 m.

En toda la superficie ocupada por el aeropuerto de Barajas podemos detectar a un avión que esté a 1 m de altura. A medida que nos alejamos del aeródromo, perdemos precisión y podremos detectar a las aeronaves a alturas mayores.

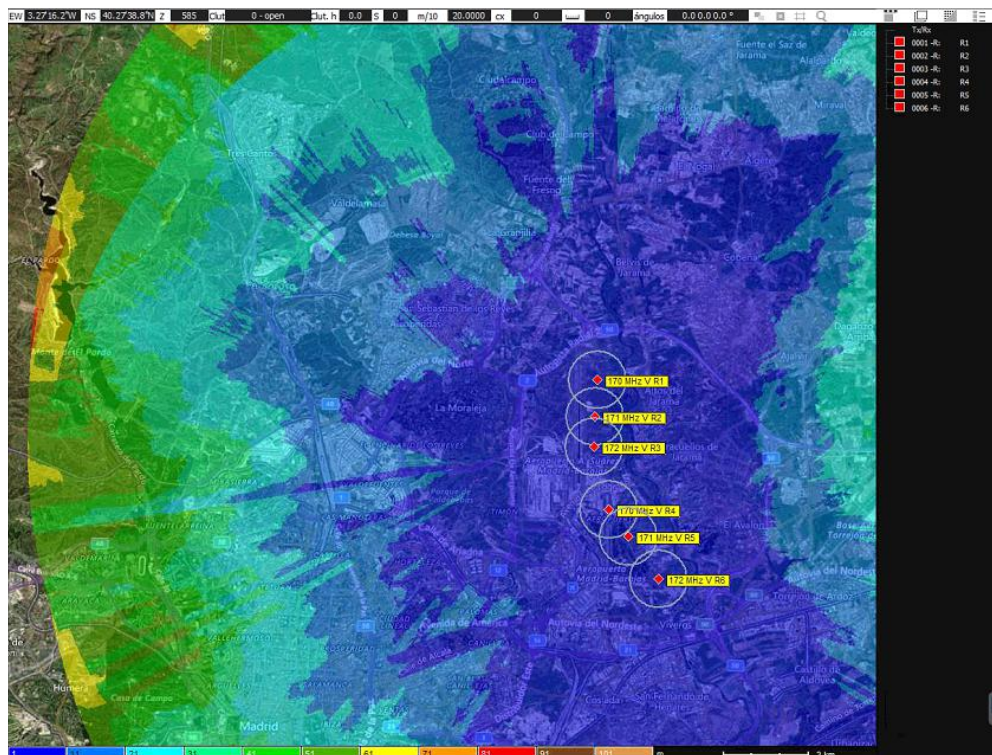


Figura 6-13. Estudio de cobertura radar compuesta

### 6.4.3 Interferencias radar

En ICS Telecom hay disponible una función que permite calcular la interferencia radar. Ésta calcula la degradación del umbral en cada radar activo producida por los otros transistores, cada 5° de azimuth. Esto significa que el cálculo se basa en la máscara IRF<sup>12</sup> (que definiremos a continuación) y en el NKTB de los radares (calculado a partir de los parámetros técnicos de la antena).

En la figura 6-14 podemos observar los distintos parámetros que el software nos permite configurar antes de calcular el valor de las interferencias provocadas por los distintos radares. A continuación se describen que significan cada una de las diferentes opciones:

- Opción **Unwanted = activated**: las interferencias no deseadas están causadas por las antenas que estén marcadas como activadas. Las estaciones desactivadas se ignoran.
- Opción **Unwanted = de-activated and activated**: se tienen en cuenta todas las entidades del mapa (tanto las activadas como las desactivadas).
- Opción **Unwanted = de-activated**: las interferencias no deseadas están provocadas por las estaciones desactivadas. Las estaciones activadas no pueden interferir en las demás.

<sup>12</sup> IRF o Interference Rejection Factor hace referencia los distintos parámetros que el software nos configurar para controlar el rechazo de interferencias. Esto significa que en función de los valores que le demos a estos parámetros, obtendremos un valor distinto de las interferencias radar causadas.



- **Collision probability (Apertures/360):** esta opción se usa para ponderar el nivel de interferencia de cada radar con una probabilidad igual la obtenida tras aplicar la ecuación (26)

$$\text{Colisión probability} = \frac{\text{Apertura de radar no deseado} \cdot \text{Apertura de radar deseado}}{360^2} \quad (26)$$

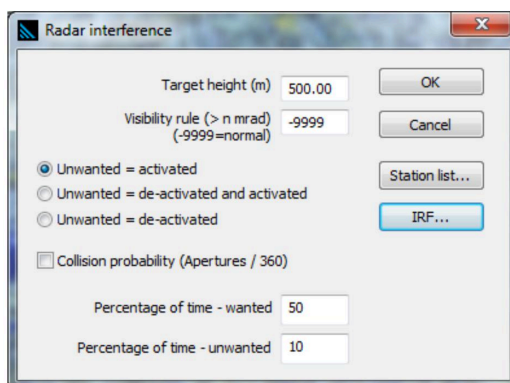


Figura 6-14. Configuración de parámetros para calcular la interferencia radar

A continuación pasamos a configurar la máscara IRF mencionados en el párrafo anterior. En la figura 6-15 podemos ver el panel de configuración proporcionado por ICS Telecom para ello. *IRF* ( $N=0$ ) representa la capacidad del receptor para rechazar la interferencia cocanal.

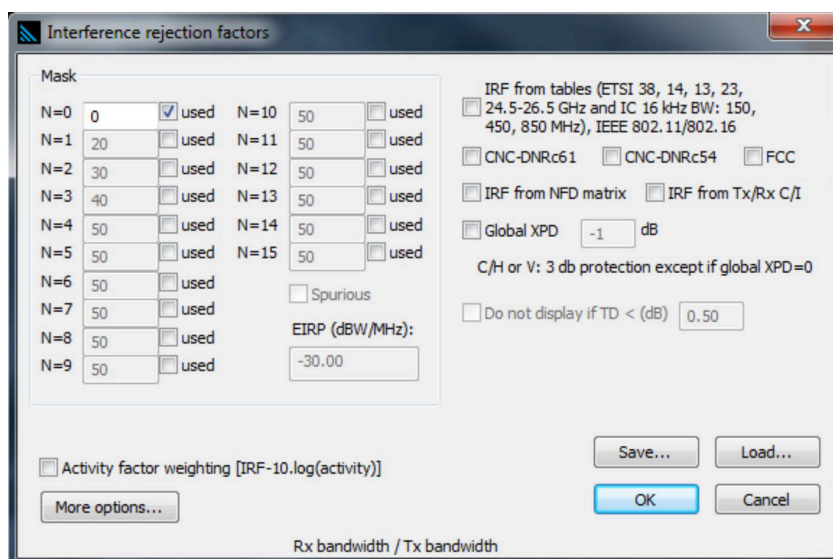


Figura 6-15. Configuración de la máscara IRF

Seguidamente, se van a realizar diferentes simulaciones modificando el valor de IRF para comprobar cómo afecta dicho parámetro a las interferencias producidas.

Listado informe

Registro	Radar #	Calign	Address	Rx Frequency (MHz)	Angle (deg)	TD (dB)	I/N (dB)	KTBF (dBm)	Threshold (dBu/m)
1	1	R1		170.000000	301	0.00	-999.00	-113	115
2	1	R1		170.000000	302	0.00	-999.00	-113	115
3	1	R1		170.000000	303	0.00	-999.00	-113	115
4	1	R1		170.000000	304	0.00	-999.00	-113	115
5	1	R1		170.000000	305	0.00	-999.00	-113	115
6	1	R1		170.000000	306	0.00	-999.00	-113	115
7	1	R1		170.000000	307	0.00	-999.00	-113	115
8	1	R1		170.000000	308	0.00	-999.00	-113	115
9	1	R1		170.000000	309	0.00	-999.00	-113	115
10	1	R1		170.000000	310	0.00	-999.00	-113	115
11	1	R1		170.000000	311	0.00	-999.00	-113	115
12	1	R1		170.000000	312	0.00	-999.00	-113	115
13	1	R1		170.000000	313	0.00	-999.00	-113	115
14	1	R1		170.000000	314	0.00	-999.00	-113	115
15	1	R1		170.000000	315	0.00	-999.00	-113	115
16	1	R1		170.000000	316	0.00	-999.00	-113	115
17	1	R1		170.000000	317	0.00	-999.00	-113	115
18	1	R1		170.000000	318	0.00	-999.00	-113	115
19	1	R1		170.000000	319	0.00	-999.00	-113	115
20	1	R1		170.000000	320	0.00	-999.00	-113	115
21	1	R1		170.000000	321	0.00	-999.00	-113	115
22	1	R1		170.000000	322	0.00	-999.00	-113	115
23	1	R1		170.000000	323	0.00	-999.00	-113	115
24	1	R1		170.000000	324	0.00	-999.00	-113	115
25	1	R1		170.000000	325	0.00	-999.00	-113	115
26	1	R1		170.000000	326	0.00	-999.00	-113	115

Listar... Cerrar

Figura 6-16. Informe de interferencia radar con IRF = 0

En la figura 6-16 podemos observar el informe de interferencias obtenido. En la tabla mostrada por el software aparecen varias columnas: Nombre de la antena, frecuencia, ángulo, relación interferencia a ruido, KTBF y umbral. En este caso el valor de la relación interferencia a ruido es de -999,00 dB, lo que significa que en este escenario no hay interferencias. El resultado obtenido tiene sentido, ya que cada antena radar está emitiendo en una frecuencia diferente. Por tanto, da igual el valor que le demos al parámetro IRF, ya que no hay interferencias.

Para poder comprobar la función del parámetro IRF, vamos a modificar nuestro escenario y vamos a plantear un caso ficticio en el cual las frecuencias de las antenas radar pasarán a ser las mostradas en la tabla 6-4.

Tabla 6-4. Asignación de frecuencias

Antena	Frecuencia
R1	170,00 MHz
R2	171,00 MHz
R3	172,00 MHz
R4	170,00 MHz
R5	171,00 MHz
R6	172,00 MHz

Listado informe

Registro	Radar #	Callsign	Address	Rx Frequency (MHz)	Angle (deg)	TD (dB)	I/N (dB)	ICBPF (dBm)	Threshold (dBuV/m)
78	1	R1		170.000000	17	0.00	-82.24	-113	115
79	1	R1		170.000000	18	0.00	-82.24	-113	115
80	1	R1		170.000000	19	0.00	-82.24	-113	115
81	1	R1		170.000000	20	0.00	-82.24	-113	115
82	1	R1		170.000000	21	0.00	-82.24	-113	115
83	1	R1		170.000000	22	0.00	-82.24	-113	115
84	1	R1		170.000000	23	0.00	-82.24	-113	115
85	1	R1		170.000000	24	0.00	-82.24	-113	115
86	1	R1		170.000000	25	0.00	-82.24	-113	115
87	1	R1		170.000000	26	0.00	-82.24	-113	115
88	1	R1		170.000000	27	0.00	-82.24	-113	115
89	1	R1		170.000000	28	0.00	-82.24	-113	115
90	1	R1		170.000000	29	0.00	-82.24	-113	115
91	1	R1		170.000000	30	0.00	-82.24	-113	115
92	1	R1		170.000000	31	0.00	-82.24	-113	115
93	1	R1		170.000000	32	0.00	-82.24	-113	115
94	1	R1		170.000000	33	0.00	-82.24	-113	115
95	1	R1		170.000000	34	0.00	-82.24	-113	115
96	1	R1		170.000000	35	0.00	-82.24	-113	115
97	1	R1		170.000000	36	0.00	-82.24	-113	115
98	1	R1		170.000000	37	0.00	-82.24	-113	115
99	1	R1		170.000000	38	0.00	-82.24	-113	115
100	1	R1		170.000000	39	0.00	-82.24	-113	115
101	1	R1		170.000000	40	0.00	-82.24	-113	115
102	1	R1		170.000000	41	0.00	-82.24	-113	115
103	1	R1		170.000000	42	0.00	-82.24	-113	115

Listar... Cerrar

Figura 6-17. Informe de interferencia radar con IRF = 0

Listado informe

Registro	Radar #	Callsign	Address	Rx Frequency (MHz)	Angle (deg)	TD (dB)	I/N (dB)	ICBPF (dBm)	Threshold (dBuV/m)
1	1	R1		170.000000	301	0.00	-152.24	-113	115
2	1	R1		170.000000	302	0.00	-152.24	-113	115
3	1	R1		170.000000	303	0.00	-152.24	-113	115
4	1	R1		170.000000	304	0.00	-152.24	-113	115
5	1	R1		170.000000	305	0.00	-152.24	-113	115
6	1	R1		170.000000	306	0.00	-152.24	-113	115
7	1	R1		170.000000	307	0.00	-152.24	-113	115
8	1	R1		170.000000	308	0.00	-152.24	-113	115
9	1	R1		170.000000	309	0.00	-152.24	-113	115
10	1	R1		170.000000	310	0.00	-152.24	-113	115
11	1	R1		170.000000	311	0.00	-152.24	-113	115
12	1	R1		170.000000	312	0.00	-152.24	-113	115
13	1	R1		170.000000	313	0.00	-152.24	-113	115
14	1	R1		170.000000	314	0.00	-152.24	-113	115
15	1	R1		170.000000	315	0.00	-152.24	-113	115
16	1	R1		170.000000	316	0.00	-152.24	-113	115
17	1	R1		170.000000	317	0.00	-152.24	-113	115
18	1	R1		170.000000	318	0.00	-152.24	-113	115
19	1	R1		170.000000	319	0.00	-152.24	-113	115
20	1	R1		170.000000	320	0.00	-152.24	-113	115
21	1	R1		170.000000	321	0.00	-152.24	-113	115
22	1	R1		170.000000	322	0.00	-152.24	-113	115
23	1	R1		170.000000	323	0.00	-152.24	-113	115
24	1	R1		170.000000	324	0.00	-152.24	-113	115
25	1	R1		170.000000	325	0.00	-152.24	-113	115
26	1	R1		170.000000	326	0.00	-152.24	-113	115

Listar... Cerrar

Figura 6-18. Informe de interferencia radar con IRF = 70

Mediante las figuras 6-17 y 6-18 podemos comprobar que a medida que aumentamos el valor de IRF, disminuye la relación interferencia a ruido o I/N. Para el caso de IRF = 0 tenemos un valor de -82,24 dB y para IRF = 70, I/N toma un valor de -152,24 dB (justamente 70 dB menos). Por tanto a medida que aumentamos el valor de IRF en un punto, conseguimos disminuir el valor de la relación I/N en un dB, esto significa que mientras a mayor valor de IRF, menor valor de interferencias.

Para finalizar este apartado, vamos a realizar un análisis de cobertura incluyendo interferencias. Para ello, vamos a basarnos en los resultados obtenidos en la figura 6-10. En ella, no se tuvieron en cuenta las interferencias. Tras un procesado de éste realizado mediante ICS Telecom, se le añaden las distintas interferencias. El mapa resultante se muestra en la figura 6-19 y los podemos interpretar de la siguiente manera:

- Cuando no hay interferencia (lo que significa que ambos mapas de detección son los mismos), entonces se muestra el mapa de detección.
- Cuando hay un caso de interferencia, se muestra el valor 255 (color rosa por defecto).

Como se puede observar, el mapa de la figura 6-19 es exactamente igual al de la figura 6-11. Lo que implica que no se están produciendo interferencias ninguna. Esto significa que la asignación de las frecuencias de trabajo para las distintas antenas se ha realizado de forma correcta.



Figura 6-19. Mapa de detección radar sin interferencias

Para comprobar cómo sería el resultado mostrado por ICS Telecom en el caso de haber interferencias, vamos a mostrar lo que ocurriría en el escenario ficticio que creamos en párrafos anteriores en el cual R1 y R4 tienen la misma frecuencia asignada, R2 y R4 también y lo mismo para R3 y R6. El resultado se muestra en la figura 6-20, en ella se puede apreciar como toda la superficie aparece coloreada en color rosa, es decir, en toda ella se están produciendo interferencias.

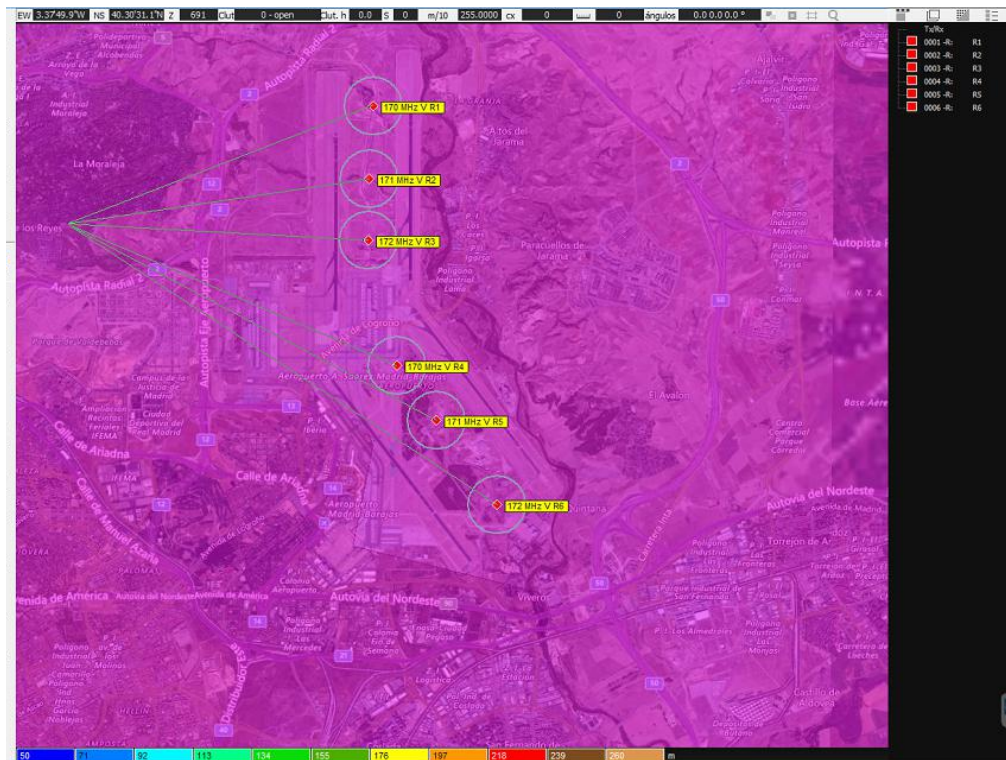


Figura 6-20. Mapa de detección radar con interferencias



## 7 RED SMR

---

El radar de movimiento de superficie (SMR, Surface movement radar) es el sistema de vigilancia de aeropuertos más utilizado en la actualidad. Se emplea para detectar aviones y vehículos en la superficie de un aeropuerto. Los controladores de tráfico aéreo lo usan para complementar las observaciones visuales. También se puede utilizar durante la noche y con baja visibilidad para controlar el movimiento de las aeronaves y los vehículos. [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43]

SMR hace referencia al radar primario que proporciona cobertura de vigilancia para el (que se define como la utilizada para el despegue, aterrizaje y rodaje de los aviones excluyendo el área de estacionamiento de las aeronaves). Podemos resumir el papel del SMR en los siguientes puntos:

- Supervisar el movimiento de aeronaves y vehículos en la zona de maniobra
- Proporcionar información de enrutamiento a los pilotos según lo vayan necesitando
- Proporcionar asesoramiento y asistencia para el movimiento seguro y eficiente de aeronaves y vehículos en la zona de maniobra

Las antenas de SMR se suelen montar en la torre, para que tengan una buena visibilidad de la zona de maniobra (aeródromos muy grandes, como el aeropuerto de Múnich, tiene incluso una segunda torre de control para su segunda terminal y el propósito de la gestión de la pista de rodaje). El entorno de la superficie terrestre es muy diferente de las altitudes.

Aunque actualmente el OACI acepta el nombre de Radar de Movimiento de Superficie, históricamente ha sido conocido por otros nombres como Radar de movimiento terrestre, equipo de detección de superficie de aeropuerto (ASDE)<sup>13</sup> e indicador de movimiento de superficie de aeródromo.

SMR se presenta típicamente como un breve video, cubierto sobre un mapa de la vista del plano de aeropuerto que muestra características tales como las pistas de aterrizaje y las calles de rodaje, las zonas ajardinadas y los edificios. En la figura 7-1 se muestra un ejemplo de visualización de SMR en una torre de control del aeropuerto de Schiphol (Amsterdam). El SMR puede ser aumentado por indicativos para identificar cada objetivo, y proporcionar advertencias en caso de conflictos potenciales entre las aeronaves en la pista. El sistema SMR también forma un elemento clave dentro del Sistema de Control y Guiado de Movimiento en Superficie Avanzado o A-SMGCS. Este sistema se compone de una combinación de elementos que proporcionan servicios a aeronaves y vehículos con el fin de mantener el rendimiento del aeropuerto bajo todas las condiciones climáticas locales, manteniendo el nivel de seguridad requerido.

Se utiliza SMR para proporcionar una alta precisión (unos 7,5 m típicamente), alta tasa de actualización (1 por segundo), alta resolución (menos de 20 m) para la detección de los objetivos del campo de aviación. Para lograr eso, SMR utilizar un pulso transmisor muy corto (40 ns). Se utiliza una frecuencia portadora en banda X o banda Ku, y antenas con un haz muy estrecho (aproximadamente 0,25° en azimuth).

La mayoría de los aeropuertos utilizan la vigilancia dependiente automática (ADS-B). El sistema también decodifica la información SSR, proporcionando así la capacidad de “marcar” el blanco con el signo de llamada del avión.

---

<sup>13</sup> ASDE o Equipo de detección de superficie de Aeropuerto es un equipo de vigilancia diseñado específicamente para detectar aeronaves, tráfico de vehículos y otros objetos, en la superficie de un aeropuerto y a presentar la imagen en una pantalla de torre. Se utiliza para aumentar la observación visual por el personal de la torre de aviones o movimientos de vehículos en las pistas y calles de rodaje.



Figura 7-1. Visualización de un sistema SMR en el aeropuerto de Schiphol (Amsterdam)

7.1 El Sistema SMR del aeropuerto Madrid-Barajas

En el aeropuerto de Madrid, hay implementado un sistema SMR que consta de dos radares de superficie. Los únicos datos que tenemos de los mismos es que uno de ellos está situado junto a la Terminal 1 en la Torre Sur y el otro de ellos junto a la T4-S en la Torre Norte. Los emplazamientos de estos radares se muestran en la figura 7-2. [19] [44] [45]

La tabla 7-1 muestra las características de los radares de superficie del aeropuerto. Además en la figura 7-2 podemos observar la configuración de dichos radares en el software de simulación utilizado.

Tabla 7–1. Características de los radares de superficie del aeropuerto de Madrid

SMR	Localización	Frecuencia	Potencia
1	Torre Norte	9.200 Hz	250 kW
2	Torre Sur	9.100 Hz	250 kW



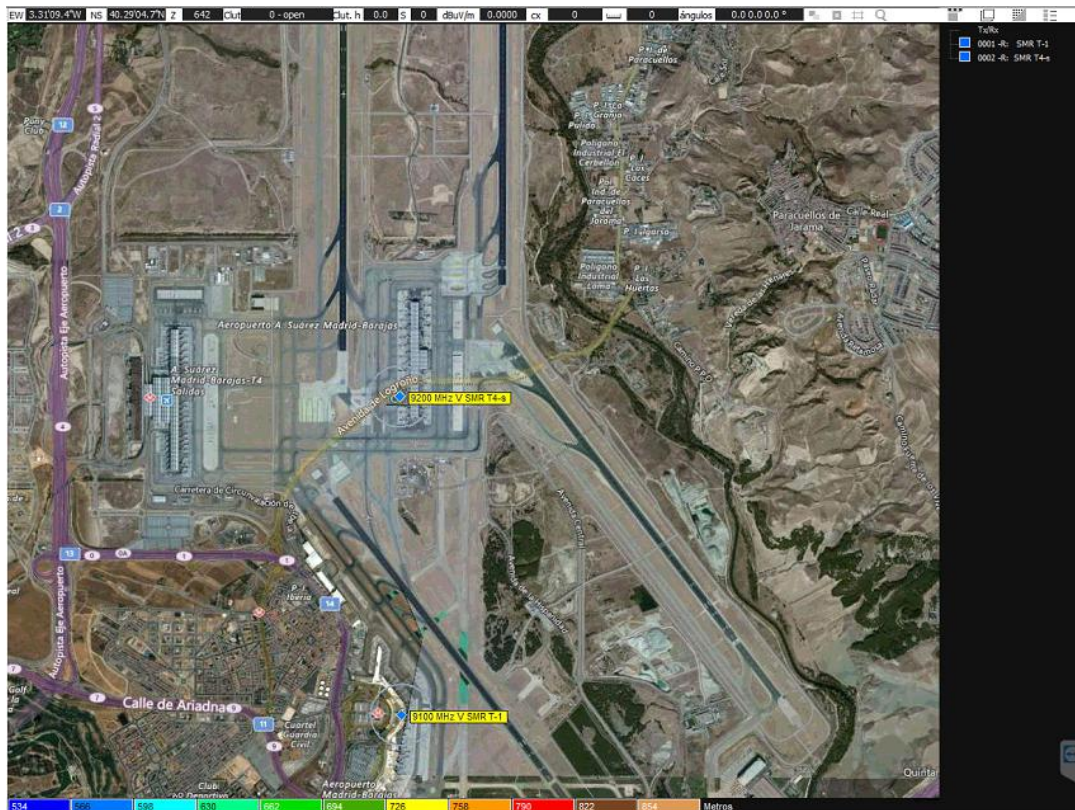


Figura 7-2. Emplazamiento de los radares SMR en el aeropuerto de Madrid

Al igual que hemos hecho en apartados anteriores, vamos a utilizar el programa ICS Telecom para realizar estudios de cobertura en los que podamos observar el alcance de los sistemas implementados en el aeropuerto de Barajas.

A continuación pasamos a configurar los parámetros de las antenas SMR. En la figura 7-3 podemos observar la configuración de dichos parámetros.

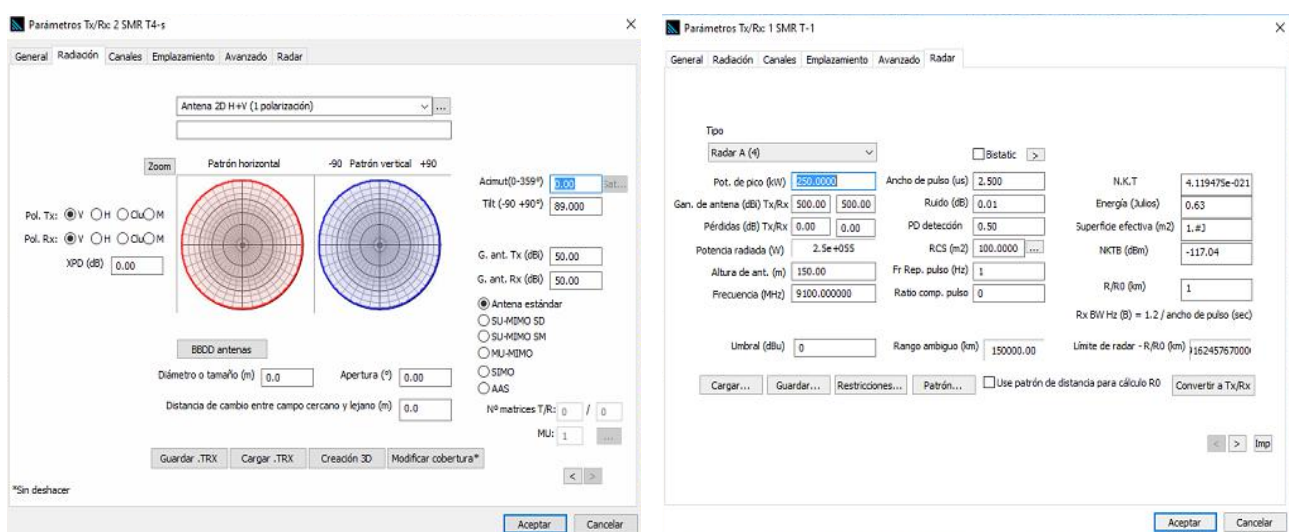


Figura 7-3. Parámetros de los SMR del aeropuerto de Madrid

ICS Telecom nos permite comprobar el alcance que tiene un sistema SMR para detectar blancos a una altura concreta. La figura 7-3 muestra el alcance de los radares de superficie del aeropuerto de Madrid para detectar

aeronaves y vehículos a una altura de 1 m. En un caso idílico y deseado por todos, esta cobertura debería llegar a todos los puntos del aeropuerto. Sin embargo en la figura 7-4 podemos ver que esto no es así.

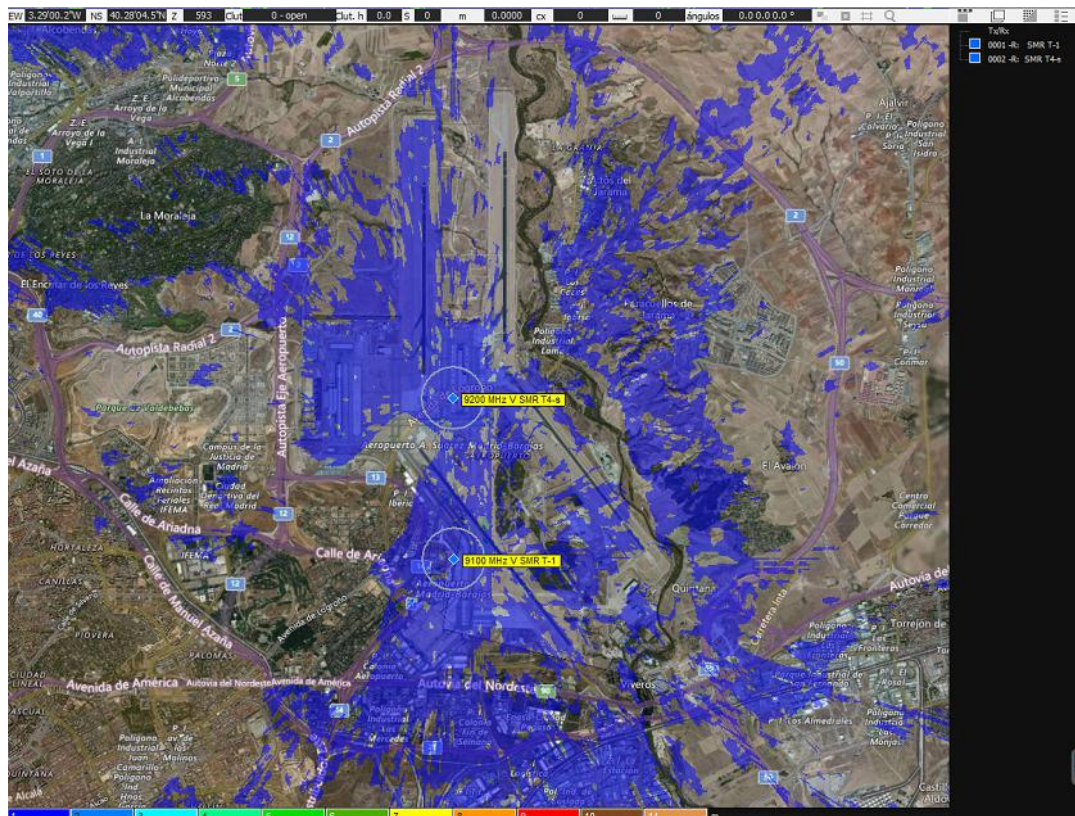


Figura 7-4. Estudio de cobertura de los sistemas SMR del aeropuerto de Madrid detectando blancos a 1 m de altura

La herramienta utilizada, también nos hace posible conocer las zonas en las que el sistema SMR es capaz de detectar blancos a una determinada altura. Mediante la figura 7-5 se puede observar que en toda la superficie del aeropuerto se pueden detectar aeronaves en un intervalo de altura de 0 a 250 m. Más concretamente, en la superficie que ocupa el aeropuerto, todos los blancos serán interceptados cuando estén a unos 20 m de altura. En la figura 7-6 lo podemos comprobar en más detalle.



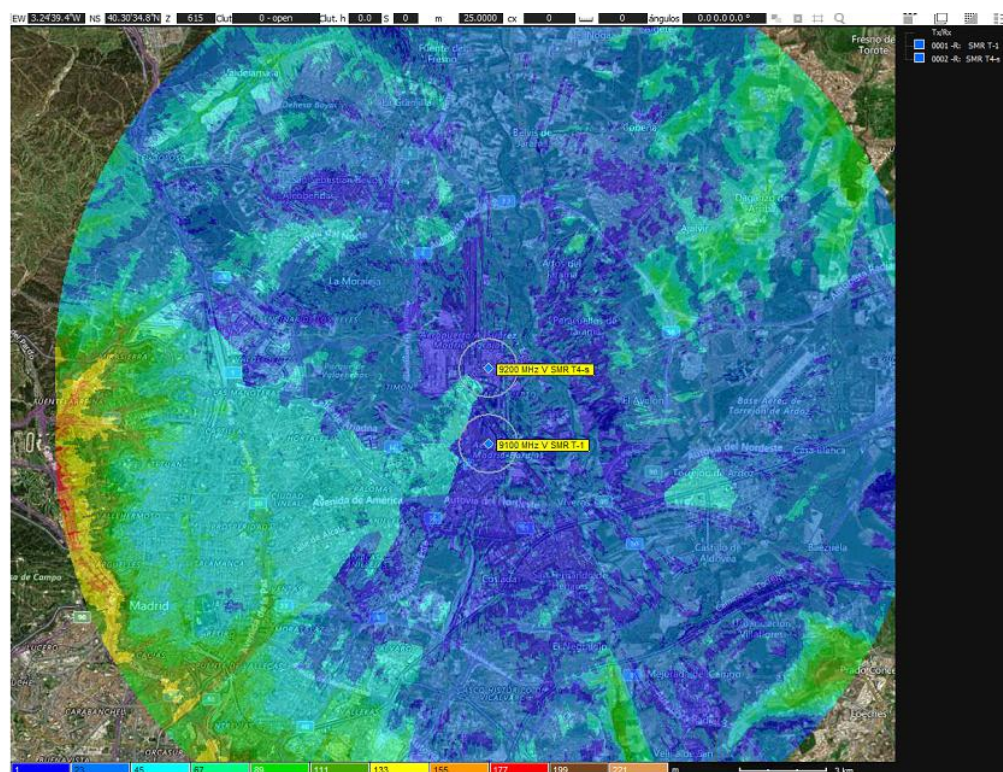


Figura 7-5. Estudio de cobertura de los sistemas SMR del aeropuerto de Madrid

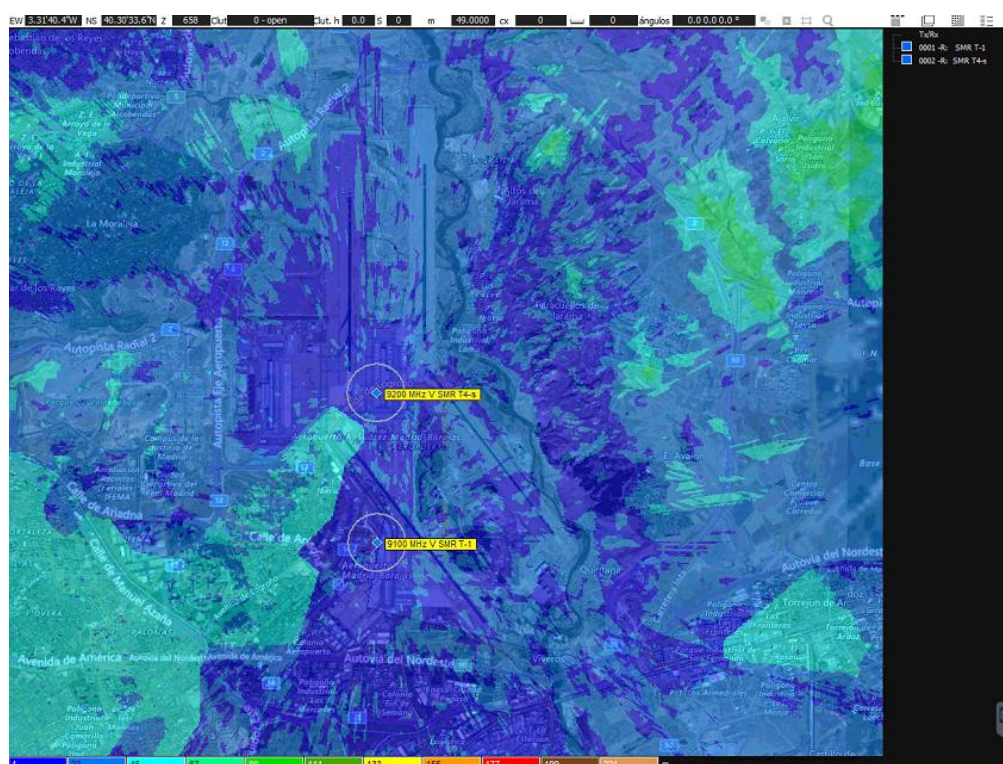


Figura 7-6. Estudio de cobertura de los sistemas SMR del aeropuerto de Madrid

En la figura 7-6 podemos ver que prácticamente toda la superficie del aeropuerto de Madrid está cubierta en color azul, lo que significa que todos los elementos que estén situados a una altura de más de 20 m serán interceptados. El tono azul más oscuro muestra los lugares del aeropuerto en los cuales se interceptan los

---

blancos situados a 1 m de altura, es decir, se identifican todos los elementos que están en la superficie del aeropuerto.

## 8 SIMULACIÓN MLAT

---

**M**LAT o multi-lateración es un avanzado sistema de posicionamiento utilizado típicamente en los aeropuertos civiles y militares. El principal propósito de dicho sistema es localizar con exactitud aviones o activos en la superficie del aeropuerto (MSS-A o Multilateration Surveillance System – Airport) o dentro del aérea de maniobra (TMA o Terminal Maneuvering Area) y en-ruta (MSS-W/WAN o Multilateration Surveillance System – Wireless/Wide Area Network) manteniendo una precisión muy alta sin importar las condiciones meteorológicas o de visibilidad. El sistema es superior a SMR/SSR en términos de precisión, especialmente cuando se despliega en aeropuertos con mucho tráfico aéreo donde una mayor precisión es crucial para hacer frente al mayor número de aviones entrantes y salientes. La precisión del sistema MLAT puede ser tan pequeña como 2 m para los activos equipados con transpondedores MLAT y puede operar conjuntamente con los sistema ASR/SMR actualmente desplegados. [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54] [55] [56] [57] [58]

El sistema de planificación MSS (Multilateration Surveillance System) requiere de tres recursos:

- El transpondedor del avión soporta Modo S para permitir la interrogación selectiva.
- Dos o más interrogadores desplegados en el aeropuerto
- Sensores MSS instalados en el aeropuerto o alrededor de él.

Las redes MSS emplean una serie de sensores de tierra, situados en localizaciones estratégicas alrededor del aeropuerto, su terminal de área local o una mayor área que cubre el espacio aéreo circundante más grande. Estos sensores están escuchando continuamente las “respuestas”, normalmente a señales de interrogación transmitidas desde el interrogador MSS local o a un Sistema Radar Secundario (SSR). Dado que cada avión estará a diferentes distancias de cada uno de los sensores, sus respuestas serán recibidas por cada sensor en momentos diferentes. Utilizando avanzadas técnicas de procesamiento informático, estas diferencias individuales de tiempo permiten calcular la posición de una aeronave con precisión tanto en la superficie como en el espacio aéreo circundante.

A diferencia de las mediciones de distancia absoluta o ángulo, medir la diferencia en la distancia entre dos estaciones da como resultado un número infinito de posiciones que satisfacen la medida. Cuando se trazan estas posibles posiciones, forman una curva hiperbólica. Para localizar la posición exacta a lo largo de esa curva, la multilateración se basa en múltiples mediciones: una segunda medición tomada a un par de estaciones diferentes producirá una segunda curva, que se interseca con la primera. Cuando se comparan las dos curvas, se revela un pequeño número de posiciones posibles, produciendo una "corrección".

### 8.1 Métodos de MLAT

La tecnología MLAT se basa en uno o en los dos métodos siguientes.

#### 8.1.1 TDOA o Diferencia de los tiempos de llegada

Un transmisor de una aeronave radia una señal, ya sea en respuesta a una interrogación o espontáneamente. Entonces se calcula el TDOA en cada sensor para la señal radiada y la posición del avión se resuelve usando la metodología TDOA.

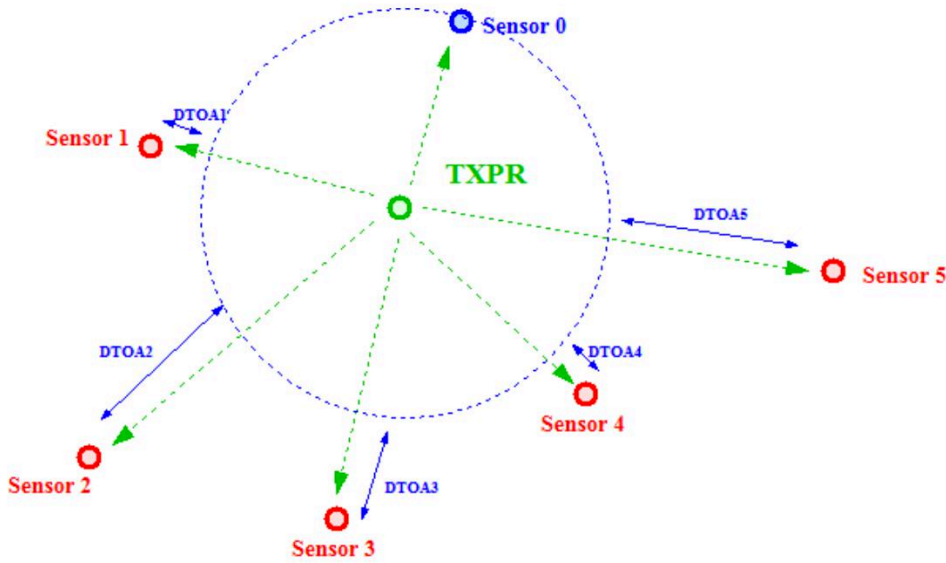


Figura 8-1. Cálculo de TDOA

### 8.1.1.1 Formulación matemática del TDOA

Esta sección describirá todas las fórmulas usadas para modelar matemáticamente un sistema MLAT que utiliza TDOA. El objetivo es estimar la magnitud de los errores de posición causados por la medida del error del TDOA.

El error de posición tridimensional en coordenadas cartesianas es caracterizado por la matriz de Covarianza de tamaño 3x3.

$$G = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

donde:

$\sigma_x^2$  es la desviación estándar de x

$\sigma_y^2$  es la desviación estándar de y

$\sigma_z^2$  es la desviación estándar de z

$\sigma_{xy}$  es la covarianza entre las coordenadas x - y

$\sigma_{xz}$  es la covarianza entre las coordenadas x - z

$\sigma_{yz}$  es la covarianza entre las coordenadas y - z

La matriz de covarianza  $G$  de los errores puede ser calculada mediante la transformación de la matriz de covarianza  $W$  en el espacio de Cartesiano 3D usando la matriz de transformación  $A$ .

$$G = (A^T * W^{-1} * A)^{-1} \quad (15)$$

La matriz de transformación  $A$  es una función de las coordenadas del emplazamiento del receptor  $S_i$  y de la posición del objetivo  $T$ . Estas coordenadas son  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(x - x_1)}{\|T - S_1\|} - \frac{(x - x_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(y - y_1)}{\|T - S_1\|} - \frac{(y - y_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(z - z_1)}{\|T - S_1\|} - \frac{(z - z_0)}{\|T - S_0\|} \\ \frac{(x - x_2)}{\|T - S_2\|} - \frac{(x - x_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(y - y_2)}{\|T - S_2\|} - \frac{(y - y_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(z - z_2)}{\|T - S_2\|} - \frac{(z - z_0)}{\|T - S_0\|} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{(x - x_{n-1})}{\|T - S_{n-1}\|} - \frac{(x - x_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(y - y_{n-1})}{\|T - S_{n-1}\|} - \frac{(y - y_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(z - z_{n-1})}{\|T - S_{n-1}\|} - \frac{(z - z_0)}{\|T - S_0\|} \end{bmatrix} \quad (16)$$

siendo  $\|T - S_i\|$  la distancia entre el objetivo  $T$  y el sensor  $S_i$ .

$W$  es la matriz de covarianza que caracteriza los errores de las mediciones:

$$W = c^2 * \sigma_\tau * \begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

donde  $\sigma_\tau$  es la desviación estándar de las medidas de TOA para cada receptor (asumiendo que los errores de las mediciones TOA tiene el mismo valor en todos los emplazamientos de los receptores).

La transformación de la matriz de covarianza  $G$  puede ser expresada como sigue a continuación

$$G = c^2 * \sigma_\tau * D(x, y, z) \quad (18)$$

Reemplazando  $G$  por su valor conseguimos:

$$(A^T * W^{-1} * A)^{-1} = c^2 * \sigma_\tau * D(x, y, z) \quad (19)$$

Operando:

$$(A^T * c^2 * \sigma_\tau * \begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 2 \end{bmatrix} * A)^{-1} = c^2 * \sigma_\tau * D(x, y, z) \quad (20)$$

Simplificando nos queda lo siguiente:

$$D(x, y, z) = (A^T * \begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 2 \end{bmatrix} * A)^{-1} \quad (21)$$

La matriz  $D$  permite calcular la  $HDOP$  (Horizontal Dilution Precision) y  $VDOP$  (Vertical Dilution Precision) (dilución horizontal de precisión y dilución vertical de precisión)

$$HDOP = \sqrt{D(1,1) + D(2,2)} \quad (22)$$

$$VDOP = \sqrt{D(3,3)} \quad (23)$$

Lo que nos lleva a las desviaciones estándar de las posiciones horizontales y verticales ( $\sigma_{Hor}$  y  $\sigma_{Ver}$ ). Este resultado es alcanzado mediante la aplicación del mismo coeficiente para  $HDOP$  y  $VDOP$  respectivamente,

$$\sigma_{Hor} = c * \sigma_\tau * HDOP(x, y, z) = c * \sigma_\tau * \sqrt{D(1,1) + D(2,2)} \quad (24)$$

$$\sigma_{Ver} = c * \sigma_t * VDOP(x, y, z) = c * \sigma_t * \sqrt{D(3,3)} \quad (25)$$

### 8.1.1.2 Métodos para calcular el TDOA

Existen principalmente dos métodos para calcular el TDOA: a partir del TOA (Time of Arrival o Tiempo de llegada) o mediante la correlación de las señales recibidas.

- A partir del tiempo de llegada (TOA) de cada señal

Consiste en medir los tiempos de llegada de la misma señal (TOA) y calcular sus diferencias. Este método se emplea cuando se puede medir con facilidad un blanco determinado, como es el caso de las señales enviadas por los transpondedores (SSR) de las aeronaves.

El proceso de obtención de TDOA se describe a continuación:

- El bloque demodulador (“Down converter”) recibe la señal de radiofrecuencia a 1.090 MHz, y la convierte en una señal de banda base. La salida puede ser una señal I-Q, o una señal de vídeo
- El bloque de digitalización (“Digitalisation”) emplea un conversor A/D, o similar con el fin de digitalizar la señal obtenida a la salida del bloque anterior.
- Una vez digitalizada la señal, el sistema TOA asociado al receptor calcula el tiempo de llegada de la señal. El contenido del mensaje es extraído para poder efectuar la correlación.
- Una vez obtenidas las medidas de TOA para cada receptor, el bloque de correlación de TDOA agrupa las señales con el mismo contenido, puesto que estas pertenecen a una misma transmisión de una aeronave determinada. Así pueden calcularse las diferencias entre los tiempos de llegada (TDOA).
- El algoritmo de localización (“TDOA algorithm”) calcula la posición de la aeronave (X,Y,Z) a partir de las medidas de TDOA.
- Finalmente, dichas medidas de posición alimentan un filtro de seguimiento (“tracker”), encargado de crear una pista para cada aeronave, mejorando la precisión mediante filtrado y desestimando los datos erróneos.

En la figura 8-2 se muestra este proceso.

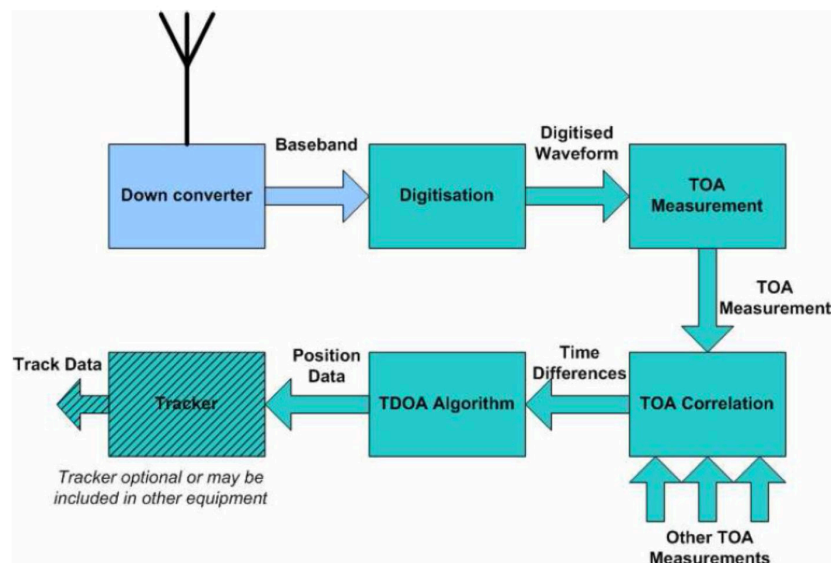


Figura 8-2. Cálculo de TDOA a partir del TOA



- Mediante correlación cruzada

Este método consiste en obtener directamente el TDOA mediante procesamiento, sin medir el TOA de cada señal. Estos sistemas se emplean mayormente en entornos militares (ESM), o para la localización de teléfonos móviles durante las llamadas de emergencia.

El proceso de obtención TDOA se describe a continuación:

- Las etapas de conversión a banda base y digitalización son análogas a las descritas en el apartado anterior, convirtiendo la señal de radiofrecuencia a banda base, para luego digitalizarla.
- Tras la digitalización, el bloque de correlación cruzada (Cross-Correlation) combina las señales digitalizadas para cada pareja de estaciones. Asumiendo que la misma señal ha sido recibida en ambas estaciones, puede calcularse la diferencia de tiempos de llegada. La precisión de este proceso está determinada por el tipo de señal digitalizada y el multirrayecto, entre otros factores. Cabe destacar que los algoritmos empleados deben garantizar que la correlación cruzada de señales no produzca resultado ambiguos o incorrectos, especialmente cuando las señales recibidas son respuestas SSR que intrínsecamente no ofrecen propiedades de autocorrelación y correlación cruzada.
- El algoritmo de localización y el filtro de seguimiento son análogos a los descritos en la sección anterior.

### 8.1.2 TSOA o Suma de tiempos de llegada

Primeramente, el transmisor del avión (TXPR en la figura 8-3) debe ser interrogado por un sistema de multilateración interrogador. En segundo lugar, como respuesta a la interrogación, el transmisor del avión calcula para cada sensor la diferencia de tiempo entre cuando se irradia la interrogación y el sensor recibe la respuesta.

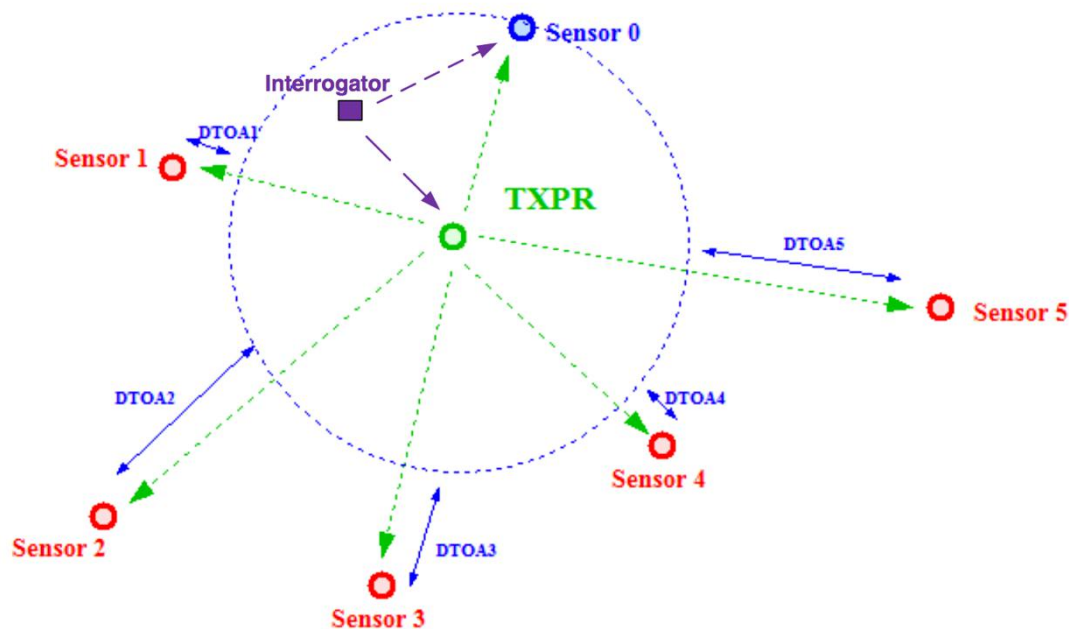


Figura 8-3. Cálculo de TSOA

#### 8.1.2.1 Formulación matemática para del TSOA

Esta sección describirá las fórmulas usadas para modelar matemáticamente un sistema MLAT que utiliza TSOA.

La matriz de covarianza  $G$  (representada en la ecuación 15) de los errores en coordenadas cartesianas puede ser calculada mediante la transformación de la matriz de covarianza  $W$  en el espacio cartesiano 3D utilizando la matriz de transformación  $A$ . Esto se expresa en la ecuación 26.

$$G = (A_{EH}^T * W_{EH}^{-1} * A_{EH})^{-1} \quad (26)$$

La matriz de transformación  $A_{EH}$  es una función de las posiciones de las localizaciones de los receptores  $S_i$  y de la posición del objetivo  $T$ . Estas posiciones vienen dadas por las variables  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(x - x_1)}{\|T - S_1\|} - \frac{(x - x_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(y - y_1)}{\|T - S_1\|} - \frac{(y - y_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(z - z_1)}{\|T - S_1\|} - \frac{(z - z_0)}{\|T - S_0\|} \\ \frac{(x - x_2)}{\|T - S_2\|} - \frac{(x - x_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(y - y_2)}{\|T - S_2\|} - \frac{(y - y_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(z - z_2)}{\|T - S_2\|} - \frac{(z - z_0)}{\|T - S_0\|} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{(x - x_{n-1})}{\|T - S_{n-1}\|} - \frac{(x - x_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(y - y_{n-1})}{\|T - S_{n-1}\|} - \frac{(y - y_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(z - z_{n-1})}{\|T - S_{n-1}\|} - \frac{(z - z_0)}{\|T - S_0\|} \\ \frac{(x - x_{Irr})}{\|T - S_{Irr}\|} - \frac{(x - x_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(y - y_{Irr})}{\|T - S_{Irr}\|} - \frac{(y - y_0)}{\|T - S_0\|} & \frac{(z - z_{Irr})}{\|T - S_{Irr}\|} - \frac{(z - z_0)}{\|T - S_0\|} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Y  $W$  es la matriz de covarianza que caracteriza los errores de las mediciones

$$W = c^2 * \sigma_\tau * \begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 & -1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 2 & -1 \\ -1 & -1 & \dots & -1 & \sigma_{EI}^2 / \sigma_\tau^2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

donde  $\sigma_\tau$  es la desviación estándar de las medidas TDOA para cada receptor (asumiendo que los errores de las mediciones TOA tienen el mismo valor para los emplazamientos de todos los receptores y  $\sigma_{EI}$  es la desviación estándar de las mediciones TSOA (incluyendo el error TDOA  $\sigma_0$  y el jitter de la latencia del transpondedor).

Todo esto nos lleva a que las desviaciones estándar de las posiciones horizontal y vertical ( $\sigma_{Hor}$  y  $\sigma_{Ver}$ )

$$\sigma_{Hor} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sqrt{G(1,1) + G(2,2)} \quad (29)$$

$$\sigma_{Ver} = \sigma_z = \sqrt{G(3,3)} \quad (30)$$

## 8.2 Aplicaciones de MLAT

Los sistemas MLAT tienen múltiples aplicaciones. A continuación se lista un pequeño resumen de ellas.

- Aeropuertos
- Área terminal
- Áreas amplias
- Unidad de monitorización de alturas
- Operaciones de aeropuerto y gestión de llegadas.
- Gestión ambiental
- Monitorización de precisión de la pista

## 8.3 Requisitos para una red MLAT

Para realizar un diseño adecuado de un sistema MSS, uno debe entender firmemente los requisitos del sistema y su aplicación primaria. El despliegue de un sistema MSS tiene dos aplicaciones primarias: MSS-A y MSS-W. La administración del aeropuerto puede seleccionar una o dos de estas aplicaciones.

### 8.3.1 MSS-A

El MLAT para el posicionamiento en la superficie del aeropuerto requiere alta precisión para evitar colisiones y accidentes. Los aeropuertos pueden estar muy ocupados (lo que puede generar mayor posibilidad de confusión) especialmente cuando la visibilidad es limitada debido a las condiciones climáticas.

El posicionamiento preciso de MLAT requiere que la señal de “respuesta” de la aeronave sea escuchada por un mínimo de 4 sensores. Esto debe cumplirse en las pistas, las áreas de maniobra del terminal y la pista de rodaje. La red MSS funciona en 1030-1090 MHz y esta frecuencia está sujeta a efectos de trayectos múltiples, tales como difracción y reflexiones que pueden comprometer el rendimiento del sistema. Por lo tanto, estos sensores deben instalarse en lugares sobre el aeropuerto con máxima visibilidad (condiciones de LOS).

Sería ideal que los sensores se dispersaran en todas las direcciones para producir formas geométricas no lineales, mejorando así la precisión del sistema. Por ejemplo, se pueden disponer 3 sensores en forma de triángulo en lugar de una línea. Y 4 sensores se pueden colocar formando cuadrado o rectángulo y así sucesivamente.

Aunque un único interrogador puede ser suficiente para cubrir toda la superficie del aeropuerto, se requiere de un número más alto (al menos dos) para lograr la redundancia espacial requerida. Por lo tanto, podemos resumir los requisitos de un sistema MSS-A de la siguiente manera:

- Mínimo de 4 sensores intervisibilidad para todas las ubicaciones objetivo.
- Una cobertura de superposición mínima de 2 transpondedores sobre los lugares de destino (cuanto mayor sea, mejor)
- Atención especial a las estructuras de obstrucción que puedan requerir sensores adicionales.

### 8.3.2 MSS-W

MSS-W o MSS-WAM es un sistema MLAT de área amplia (Wide Area Multilateration). Mientras MSS-A sólo abarca la superficie cubierta por el aeropuerto, MSS-W cubre una superficie mucho más amplia.

Cuanto más se aleja un avión del aeropuerto, más cerca están los sensores en relación a la distancia de alcance. Por lo tanto, no todos los sensores de superficie del aeropuerto añadirán un valor al sistema MSS-W como el caso del MSS-A. Las estructuras aeroportuarias, como las construcciones, son menos importantes aquí, dado que los sensores e interrogadores designados tienen una buena holgura y visibilidad del cielo. Es por eso, que los datos 3D no son necesarios para las simulaciones de MSS-W.

La separación geométrica sigue siendo la línea de base para la exactitud MLAT; por lo tanto, puede que tenga que desplegar sensores/interrogadores fuera del límite del aeropuerto o incluso en alta mar. Por ejemplo, en el pico de una montaña cercana para lograr una buena cobertura y una excelente geometría. Esta es una práctica común en Europa, Nueva Zelanda y Tasmania.

Aunque el enfoque de despliegue de WAM es aparentemente similar al de la superficie del aeropuerto, los cálculos son un poco diferentes. TDOA es un enfoque satisfactorio para los cálculos de superficie, pero WAM requiere TDOA más TSOA para mejorar la precisión.

## 8.4 Sistema MLAT en el aeropuerto de Madrid-Barajas

A continuación, vamos a modelar una red de sensores MLAT en las inmediaciones del aeropuerto de Barajas. Según algunas referencias en el aeropuerto de Madrid hay colocados 44 sensores MLAT [59] y según otras 45

[60]. Vamos a considerar el primer caso, 44 sensores, por ser el más desfavorable. Una vez más, vamos a hacer uso de la herramienta ICS Telecom para realizar las diferentes simulaciones.

### 8.4.1 MSS-A

Vamos a realizar un sistema MSS-A. Para ello vamos a colocar 44 sensores MLAT mencionados anteriormente intentando cubrir toda la superficie del aeropuerto y 2 interrogadores. En la figura 8-4, se pueden ver los emplazamientos de los distintos componentes de la red [61].

Para estas simulaciones vamos a utilizar el modelo de propagación ITU-R 525. Además, debido a los requerimientos del sistema el modelo se debe configurar para predecir la cobertura LOS solamente (visión directa).

Para todos los sensores se va a definir un umbral individual de -75 dBm y como umbral global  $1 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ . Según el modelo de propagación que hemos elegido, vamos a tener dos situaciones:

1. Si se cumple que la potencia está por encima del 60% del elipsoide del Fresnel, significa que la potencia recibida es  $\geq 1 \text{ dB}\mu\text{V/m}$
2. Si por el contrario no se cumple con el 60% del elipsoide de Fresnel la potencia recibirá será igual a  $0 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ .



Figura 8-4. Emplazamientos de los sensores e interrogadores del sistema MSS-A

Vamos a hacer zoom sobre la figura 8-4 para ver un poco más en detalle la colocación de los distintos sensores MLAT. En la figura 8-5 podemos observar un poco mejor la colocación de los sensores MLAT.





Figura 8-5. Emplazamientos de los sensores e interrogadores del sistema MSS-A

Tal y como hemos hecho en los capítulos anteriores, el siguiente paso es la configuración de los parámetros de las diferentes antenas. En la figura 8-6 se muestra la configuración de los parámetros de los sensores MLAT y en la figura 8-7 la configuración de los interrogadores.

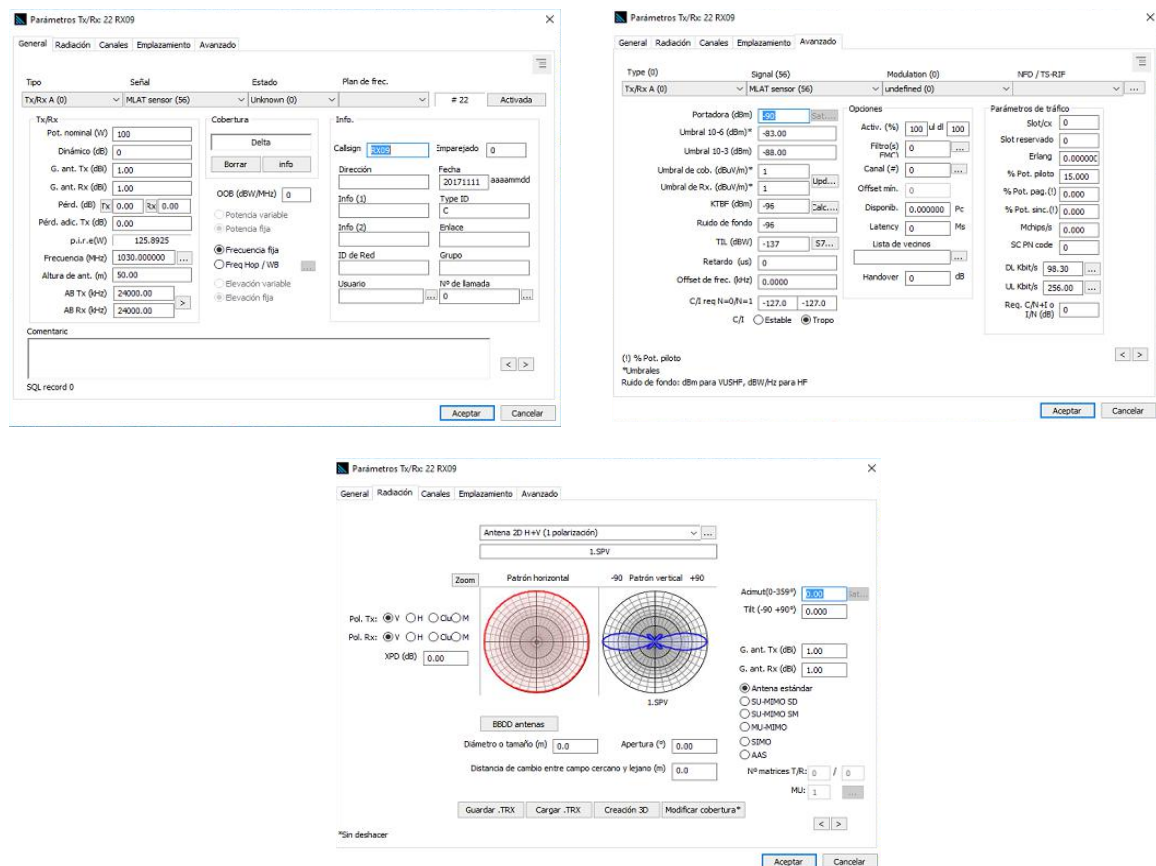


Figura 8-6. Configuración de los parámetros de los sensores MLAT

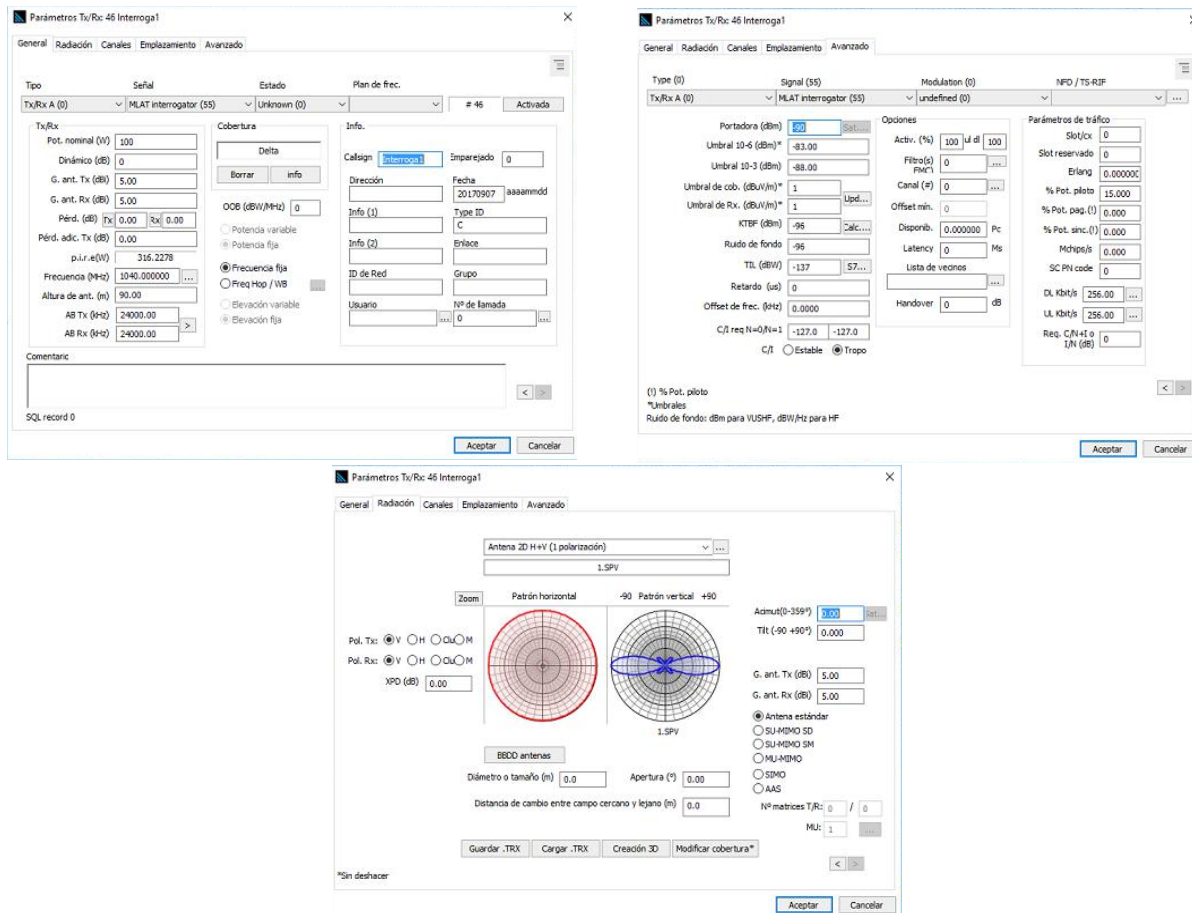


Figura 8-7. Configuración de los parámetros de los interrogadores MLAT

Tras tener en cuenta todas las consideraciones citadas en el párrafo anterior, procedemos a realizar un análisis de cobertura. Los resultados de éste son los mostrados en la figura 8-8. En color marrón claro se representan aquellas zonas del mapa en las cuales el nivel de señal MLAT está en torno a -27 dBm. Las zonas en tono marrón oscuro tienen un nivel de señal de -31 dBm. En color rojo están marcados aquellos lugares del mapa con un nivel de cobertura MLAT igual a -35 dBm. En tono amarillo están coloreadas las zonas del mapa en las cuales el nivel de señal está situado en torno a -43 dBm. Y por último, los tonos verdosos indican aquellas zonas con un nivel de señal inferior a -47 dBm.



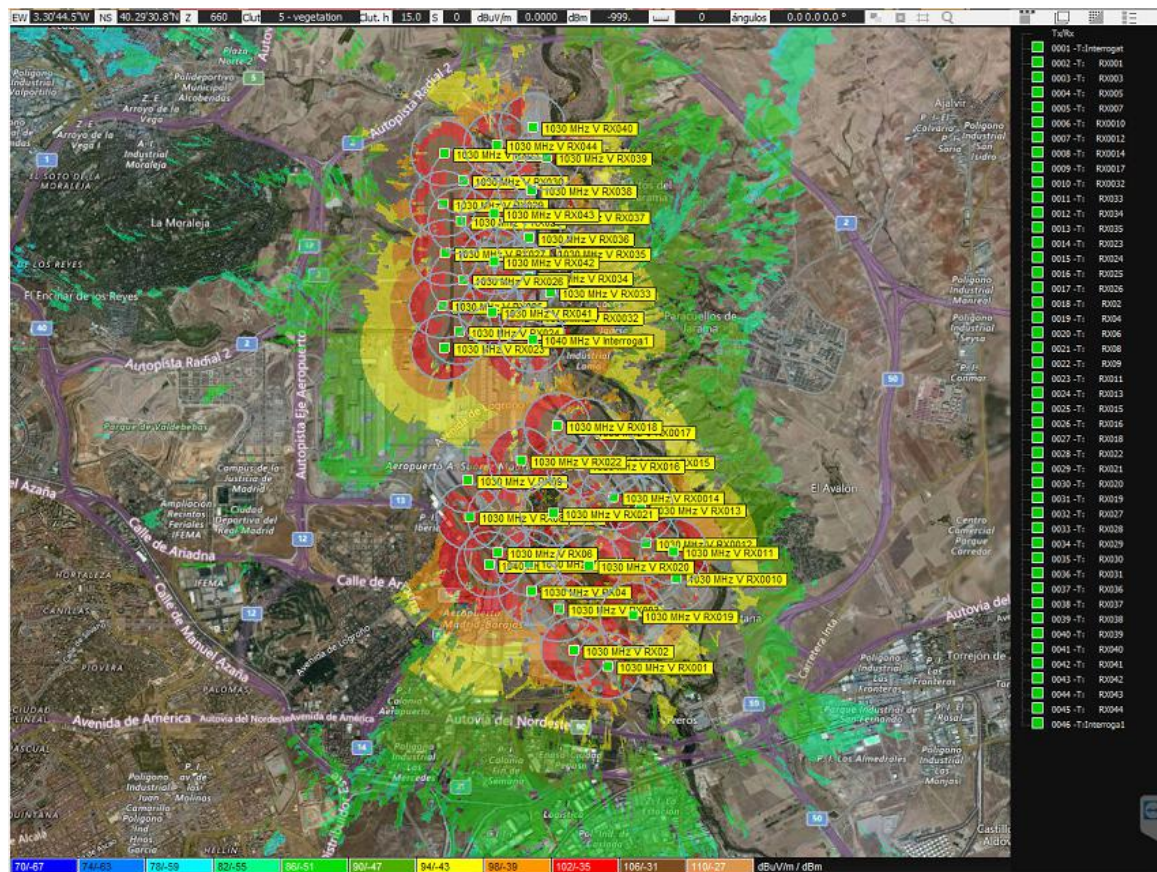


Figura 8-8. Análisis de cobertura del sistema MSS-A

Para ver un poco más en detalle el mapa de cobertura vamos a hacer zoom sobre el mapa. El resultado lo podemos observar en la figura 8-9.

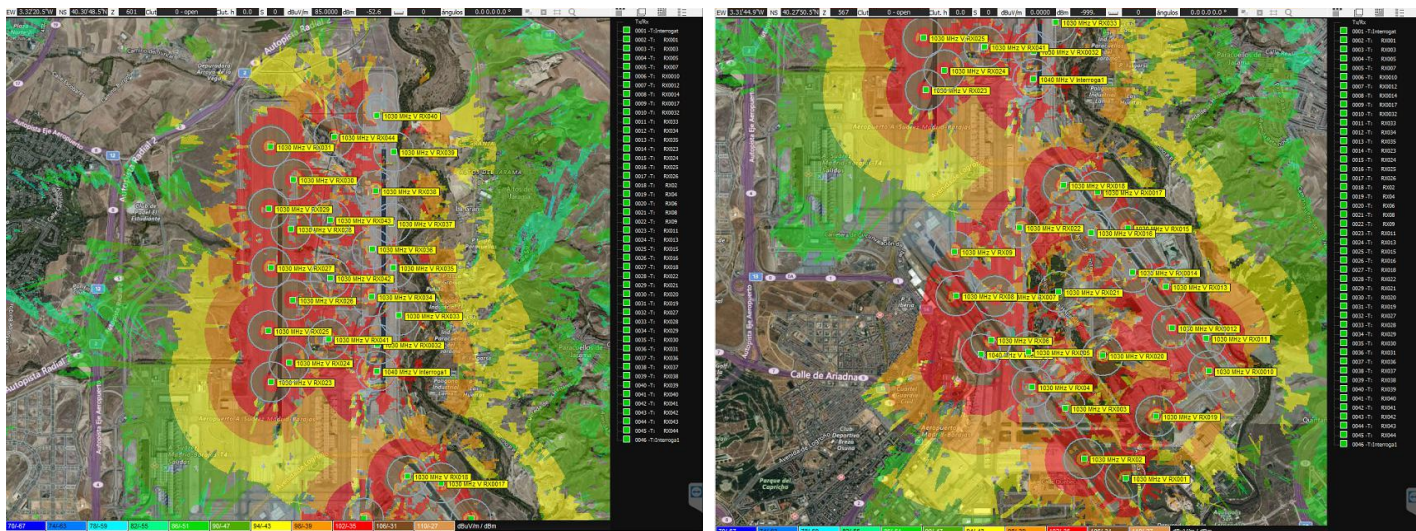


Figura 8-9. Detalle del análisis de cobertura del sistema MSS-A

En la red MSS-A tanto interrogadores como sensores son estáticos. Sin embargo, el transpondedor instalado a bordo del avión es móvil. Por tanto, cada píxel situado en el interior del aeropuerto es un transmisor potencial que debe ser capaz de transmitir la señal a un mínimo de cuatro sensores. ICS Telecom nos permite evaluar el rendimiento de cada ubicación comprobando el perfil de cada píxel en cada uno de los sensores.

La manera de evaluar el requisito es predecir la superposición de la cobertura. Por tanto, las ubicaciones con superposiciones superiores a 3 pueden clasificarse como buenas ubicaciones.



En la figura 8-10 representamos el mapa de cobertura superpuesta del sistema MSS-A, de tal forma que podemos ver el número de sensores que se conectarían en cada punto del mapa a un transpondedor situado en un avión. En azul oscuro están marcadas aquellas zonas en las cuales un transpondedor se conectaría a un único sensor MLAT. En un tono azul más claro están coloreados los puntos del mapa en los que un transpondedor se conectaría a 6 sensores MLAT. Las zonas marcadas en turquesa son aquellas ubicaciones desde las cuales un transpondedor se conectaría a 6 sensores MLAT. Marcadas en color verde se muestran aquellas zonas desde las que un transpondedor podría conectarse hasta con 21 sensores MLAT. Aquellas pequeñas zonas coloreadas en rojo son los puntos del mapa desde los cuales un transpondedor de una aeronave se conectaría a 41 sensores MLAT.

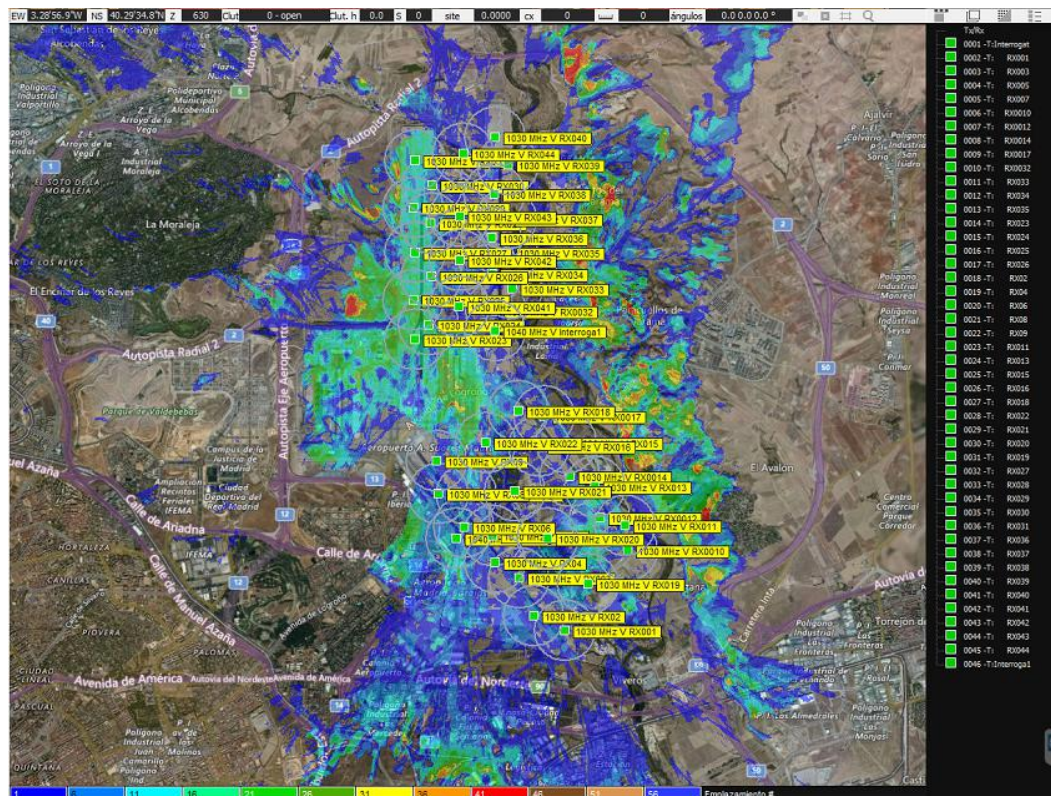


Figura 8-10. Análisis del número de sensores que podrían conectarse en cada punto del mapa a un transpondedor situado en una aeronave

Como a nosotros lo que nos interesa verdaderamente es saber en cuál de los puntos del mapa estamos conectados a cuatro o más sensores, vamos a realizar un filtrado de los resultados obtenidos en la figura 8-10 obteniendo la figura 8-11. En ella podemos apreciar claramente que en las zonas marcadas en verde estamos conectados a más de 4 sensores (zonas óptimas). En naranja aparecen marcadas las zonas en las que la aeronave se conectaría a 4 sensores y en azul estarían las zonas en las que el transpondedor se conecta a menos de 4 sensores.



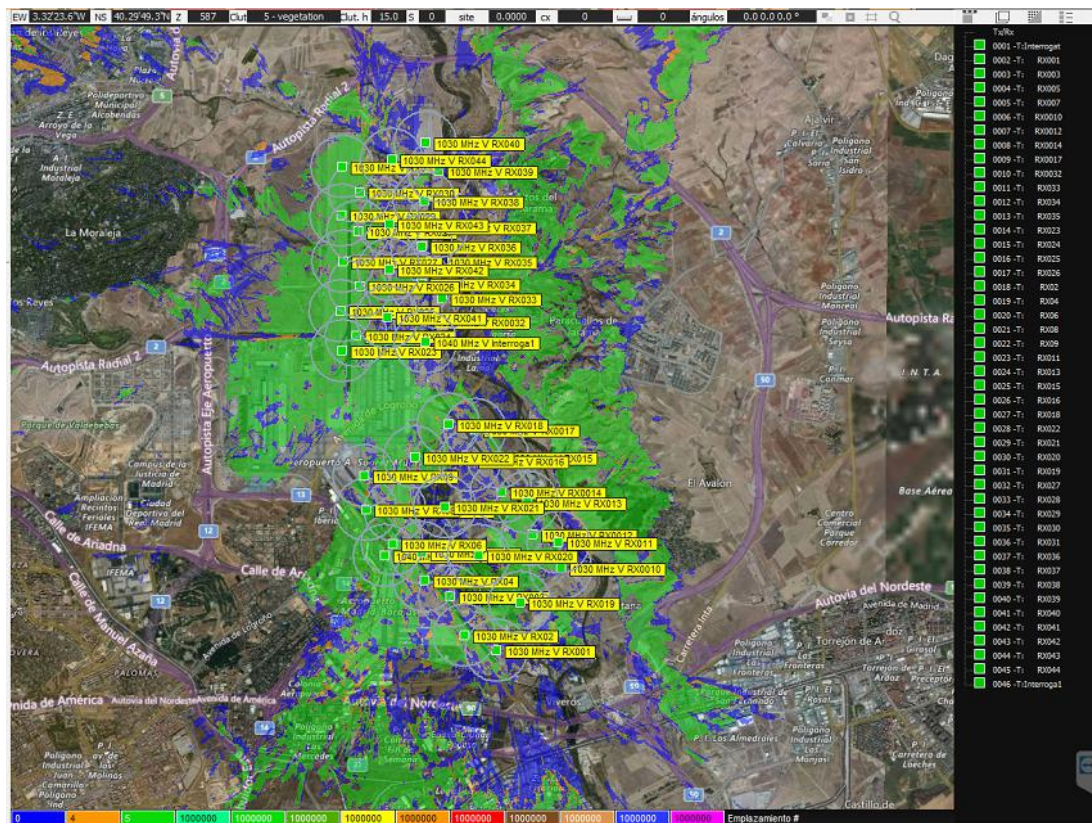


Figura 8-11. Filtrado para conocer a cuántos sensores se conectaría un transpondedor situado en una aeronave

En la figura 8-12 se muestra el mismo resultado que el obtenido en la figura 8-10 pero con un poco más de detalle.

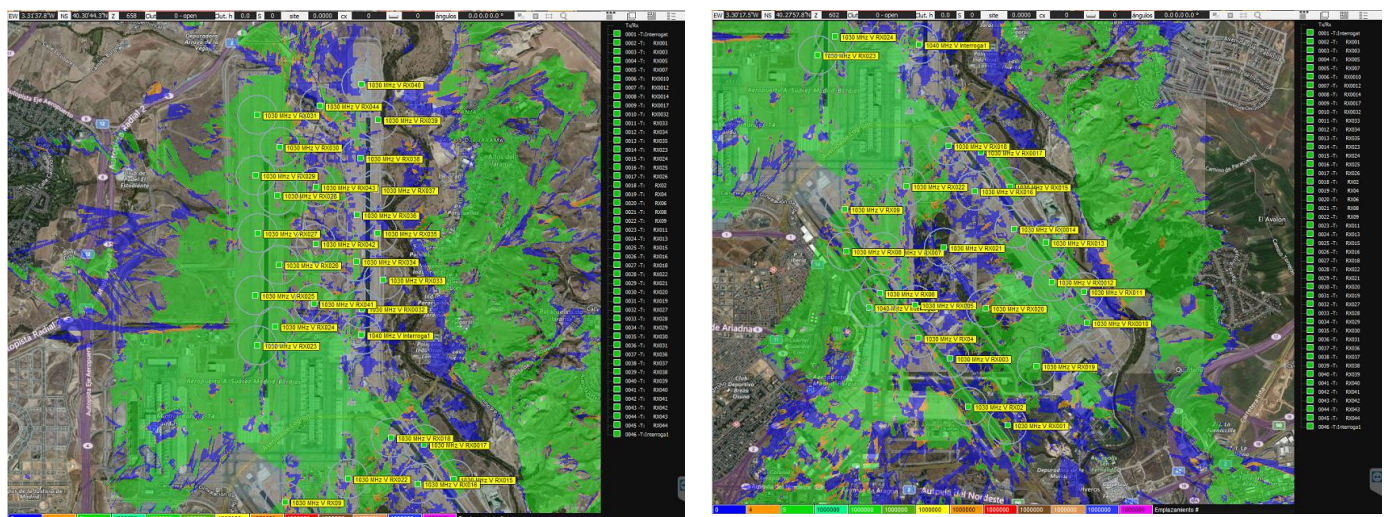
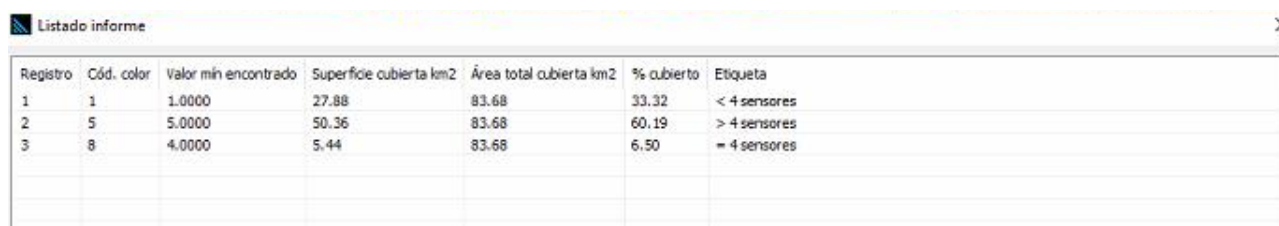


Figura 8-12. Detalle del filtrado para conocer a cuántos sensores se conectaría un transpondedor situado en una aeronave

Podemos conocer cuál es la superficie exacta cubierta por un número determinado de sensores. La figura 8-13 representa el informe obtenido a partir de la simulación mostrada en la figura 8-11. Según este informe, se puede observar que la superficie total a la que llega nivel de señal del sistema MSS-A es de 83,68 Km<sup>2</sup>. De ella, al 60,19 % llega señal procedente de más de 4 sensores diferentes.



Registro	Cód. color	Valor mín encontrado	Superficie cubierta km2	Área total cubierta km2	% cubierto	Etiqueta
1	1	1.0000	27.88	83.68	33.32	< 4 sensores
2	5	5.0000	50.36	83.68	60.19	> 4 sensores
3	8	4.0000	5.44	83.68	6.50	= 4 sensores

Figura 8-13. Informe resumen sobre el sistema MLAT del aeropuerto de Madrid

#### 8.4.2 Predicción del acceso a MSS-A

Si suponemos que el diseño de la red MSS-A tiene el siguiente requisito de precisión:

- 7,5 m con nivel de confianza del 95 % para las áreas principales
- 12 m con nivel de confianza del 99 % para áreas menores

Puesto que la herramienta proporcionada por ICS Telecom sólo predice el nivel RMS, se debe calcular el nivel de error RMS utilizando el límite del error y su nivel de confianza perspectiva.

- La prestación de error RMS para 7,5 m 95 % es igual a  $7,5\text{m}/1,96 = 3,82\text{ m}$
- La prestación de error RMS para 12 m 99 % es igual a  $12\text{m}/2,575 = 4,66\text{ m}$

Los niveles de error RMS anteriores pueden ser utilizados en la paleta de usuario.

Donde:

- Error RMS: raíz del error cuadrático medio
- 1,96 es el factor estadístico de distribución gaussiana para el intervalo de confianza del 95 %
- 2,575 es el factor estadístico de distribución gaussiana para el intervalo de confianza del 99 %

La tabla 8-1 resume a continuación los factores estadísticos para los requerimientos de los diferentes niveles de confianza.

Tabla 8–1. Distribución normal

Nivel de confianza $1 - \alpha$	$\alpha/2$	$z / \left(\frac{\alpha}{2}\right)$
90 %	5 %	1,645
95 %	2,5 %	1,96
98 %	1 %	2,33
99 %	0,5 %	2,575

El siguiente paso es proceder a la realización de una simulación de “*Multilateration*” utilizando el método “*TDOA H*”. Tras configurar los parámetros requeridos obtenemos la figura 8-14. En la tabla 8-2 se muestra el significado de cada color de la leyenda de la figura 8-14.



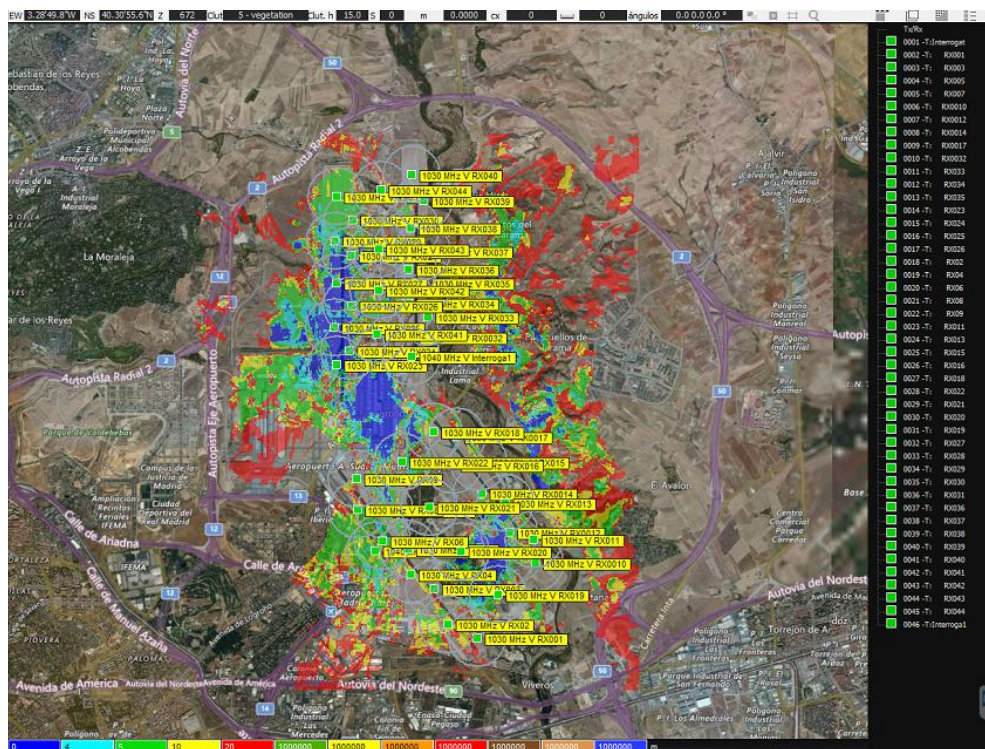


Figura 8-14. Cálculos de precisión de MLAT TDOA-H

Tabla 8-2. Leyenda de la figura 8-14

Color	Significado
Azul oscuro	RMS: 0-4 m o 7,5 con 95%
Azul celeste	RMS: 4-5 m o 12 m con 99%
Verde	RMS: 5-10 m
Amarillo	RMS: 10-20 m
Rojo	RMS: >20 m





## 9 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

A lo largo de este documento, se ha hecho una revisión de los diferentes sistemas de navegación utilizados en la actualidad dando a conocer sus características y modo de funcionamiento.

Además de todo el desarrollo teórico, se han recreado los sistemas en uno de los aeropuertos más importantes del mundo, el aeropuerto de Madrid-Barajas. Debido a su posición estratégica es uno de los aeropuertos con mayor número de pasajeros a nivel mundial. Es por ello, que implementa numerosos sistemas de navegación aérea para conseguir que los vuelos sean los más seguros posibles.

Mediante el software ICS Telecomm hemos podido comprobar de una manera visual, las características radio más importantes de los distintos sistemas. Entre los análisis realizados podemos encontrar estudios de cobertura, análisis de interferencia, estudios de mejor servidor, etc.

El primer sistema de navegación aérea descrito ha sido ILS, un sistema destinado a ayudar a los pilotos en la fase de aproximación a tierra y aterrizaje de la aeronave.

Para el guiado de las aeronaves se utiliza el sistema VOR. Es fundamental que un avión llegue a su destino sin perderse durante el vuelo. El sistema VOR ha sido descrito en el segundo capítulo.

Las estaciones de radio FM emiten en la misma banda de frecuencia que los sistemas ILS y VOR. Es por ello que en este documento se ha hecho una pequeña revisión de las interferencias que se pueden producir en los sistemas de navegación aérea provocadas por las antenas de radio FM.

En los últimos capítulos de este proyecto se han descrito varios sistemas de posicionamiento: MLAT, SMR y RADAR. Cada uno ellos tiene unas características y un funcionamiento diferente, sin embargo su misión es bastante similar: conocer la posición de las aeronaves en un momento concreto.

Todos los sistemas descritos son muy complejos y la descripción hecha aquí ha sido breve. De esta manera el lector puede comprender su funcionamiento de una forma relativamente sencilla. En documentos futuros se puede realizar un análisis más exhaustivo de los mismos, profundizando más en el funcionamiento de los sistemas e incluso realizando un modelado matemático de ellos.

También sería interesante realizar un estudio sobre los nuevos sistemas de navegación que están surgiendo y que con el paso de los años irán sustituyendo a los sistemas actualmente utilizados y descritos en este proyecto.



# REFERENCIAS

---

- [1] [http://www.profesorenlinea.cl/mediosocial/Avion\\_Historia.htm](http://www.profesorenlinea.cl/mediosocial/Avion_Historia.htm)
- [2] <https://es.wikipedia.org/wiki/Avión>
- [3] <http://www.aeropuertomadrid-barajas.com>
- [4] <http://www.aeropuertos.net/aeropuerto-de-madrid/>
- [5] [https://es.wikipedia.org/wiki/Aeropuerto\\_de\\_Madrid-Barajas](https://es.wikipedia.org/wiki/Aeropuerto_de_Madrid-Barajas)
- [6] [http://www.aena-aeropuertos.es/csee/Satellite?Language=ES\\_ES&ca=MAD&pagename=cartografia&ps=t&ti=T4S](http://www.aena-aeropuertos.es/csee/Satellite?Language=ES_ES&ca=MAD&pagename=cartografia&ps=t&ti=T4S)
- [7] [http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/empresas/trabajo\\_aereo/tecnica-operativa/operaciones/manual-ils-cat-ii-iii-con-apendice.pdf](http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/empresas/trabajo_aereo/tecnica-operativa/operaciones/manual-ils-cat-ii-iii-con-apendice.pdf)
- [8] [http://ics-telecom.wikia.com/wiki/ICS\\_Telecom\\_Wiki](http://ics-telecom.wikia.com/wiki/ICS_Telecom_Wiki)
- [9] [https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_aterrizaje\\_instrumental](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_aterrizaje_instrumental)
- [10] <http://www.hispaviacion.es/sistema-instrumental-de-aterrizaje-el-ils/>
- [11] <https://aviationstudios-latinoamerica.blogspot.com.es/2015/06/sistema-de-aterrizaje-instrumental-ils.html>
- [12] [https://www.ecured.cu/Sistema\\_de\\_Aterrizaje\\_instrumental](https://www.ecured.cu/Sistema_de_Aterrizaje_instrumental)
- [13] <https://www.cimformacion.com/blog/aeronautica/que-es-el-sistema-de-aterrizaje-por-instrumentos/>
- [14] [https://prezi.com/wwt0\\_4pw1m0n/ils-sistema-de-aterrizaje-instrumental/](https://prezi.com/wwt0_4pw1m0n/ils-sistema-de-aterrizaje-instrumental/)

- [15] <http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/it/rd/apuntes/ilsmls.pdf>
- [16] <http://electroaeronautica.galeon.com/enlaces1915167.html>
- [17] <http://antennaproducts.com/aviation/glideslope-ils/>
- [18] <http://www.atdi.com/ics-online/>
- [19] ATDI South Pacific Pty Ltd. «Radio Planning with ICS Telecom. Aeronautical Network Design». Australia: ATDI South Pacific Pty Ltd, 2007. A.C.N. 114 949 932 – A.B.N. 42 114 949 932
- [20] «ILS Modelling with ATDI Tools. Release number v1.0» ATDI advanced radiocommunications.
- [21] [https://es.wikipedia.org/wiki/Radiofaro\\_omnidireccional\\_VHF](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiofaro_omnidireccional_VHF)
- [22] <http://www.trevord.com/navaids/>
- [23] [https://es.wikipedia.org/wiki/Usuario:Italcala/sistema\\_vor](https://es.wikipedia.org/wiki/Usuario:Italcala/sistema_vor)
- [24] <http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/it/rd/apuntes/handout5.pdf>
- [25] <https://www.aviacionmexico.com/que-es-un-vor/>
- [26] <https://allaboutairplanes.wordpress.com/tag/vor/page/2/>
- [27] <http://the-y29.blogspot.com.es/2009/03/vor-que-es-y-como-funciona-e-n-esta.html>
- [28] <https://aviationstudios-latinoamerica.blogspot.com.es/2015/06/radiofaro-omnidireccional-vhf-vor.html>
- [29] <http://elvueloporinstrumentos.blogspot.com.es/2013/08/radiofaro-omnidireccional-de-vhf-vor.html>
- [30] <http://bsas-vac.tripod.com/Dfc/Vuelo2/navegacionvor/vor4.htm>
- [31] [http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90375/fichero/Memoria\\_TFG\\_Carmen\\_Bejarano.pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90375/fichero/Memoria_TFG_Carmen_Bejarano.pdf)
- [32] «Recomendación UIT-R SM. 1009-9. Compatibilidad entre el servicio de radiodifusión sonora en la banda de aproximadamente 87-108 MHz y los servicios aeronáuticos en la banda 108-137 MHz». Ginerabra: 2011.

- [33] «SM1009 in ATDI tools». Madrid: ATDI Ibérica.
- [34] <https://es.wikipedia.org/wiki/Radar>
- [35] [https://en.wikipedia.org/wiki/Surface\\_movement\\_radar](https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_movement_radar)
- [36] <http://www.radartutorial.eu/02.basics/Surface%20Movement%20Radar.en.html>
- [37] <https://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1951/1951%20-%200634.html>
- [38] <http://www.indracompany.com/es/surface-movement-radar>
- [39] <https://www.terma.com/surveillance-mission-systems/radar-systems/airport-surface-movement-radar/>
- [40] [https://www.skybrary.aero/index.php/Surface\\_Movement\\_Radar](https://www.skybrary.aero/index.php/Surface_Movement_Radar)
- [41] [https://onlineexhibitormannual.com/worldatmcongress17/PDF/Brochure\\_exhiReg1233210\\_brochure\\_with\\_hyperlinks\\_security\\_\\_\\_surveillance\\_radar\\_scanner\\_5000\\_series\\_-\\_surface\\_movement\\_radar\\_a4.pdf](https://onlineexhibitormannual.com/worldatmcongress17/PDF/Brochure_exhiReg1233210_brochure_with_hyperlinks_security___surveillance_radar_scanner_5000_series_-_surface_movement_radar_a4.pdf)
- [42] <https://geekytheory.com/radar-de-aviacion-comercial-parte-1-principio-de-funcionamiento-y-materiales>
- [43] [https://books.google.es/books?id=8ET4GVAJvdAC&pg=PA122&lpg=PA122&dq=AIRPORT+SURFACE+MOVEMENT+RADAR+Madrid&source=bl&ots=em6Uz8KMEB&sig=WgCKQ4wkGZyt3fl6SuV5MXzCt\\_rQ&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi17pjarqLXAhWLvhQKHR9ZCvIQ6AEIbDAM#v=onepage&q=AIRPORT%20SURFACE%20MOVEMENT%20RADAR%20Madrid&f=false](https://books.google.es/books?id=8ET4GVAJvdAC&pg=PA122&lpg=PA122&dq=AIRPORT+SURFACE+MOVEMENT+RADAR+Madrid&source=bl&ots=em6Uz8KMEB&sig=WgCKQ4wkGZyt3fl6SuV5MXzCt_rQ&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi17pjarqLXAhWLvhQKHR9ZCvIQ6AEIbDAM#v=onepage&q=AIRPORT%20SURFACE%20MOVEMENT%20RADAR%20Madrid&f=false)
- [44] <http://www.microwavejournal.com/articles/27913-madrid-barajas-airport-operates-surface-movement-radar-from-terma>
- [45] <https://www.terma.com/surveillance-mission-systems/radar-systems/airport-surface-movement-radar/>
- [46] [http://www.indracompany.com/sites/default/files/16\\_MLAT\\_Brochure\\_V1\\_11-2009\\_esp.pdf](http://www.indracompany.com/sites/default/files/16_MLAT_Brochure_V1_11-2009_esp.pdf)
- [47] [https://www.icao.int/SAM/Documents/2015-SEMAUTOM/Ses3%20Pres02b%20SISTEMA%20MLAT\\_WAM%20INDRA.pdf](https://www.icao.int/SAM/Documents/2015-SEMAUTOM/Ses3%20Pres02b%20SISTEMA%20MLAT_WAM%20INDRA.pdf)
- [48] <https://es.wikipedia.org/wiki/Multilateración>
- [49] <http://www.multilateration.com/surveillance/multilateration.html>

- [50] <http://www.inycom.es/actualidad/21-contenido/contenido-i-d/238-mlat>
- [51] <http://aeropuertocordoba.blogspot.com.es/2015/09/el-sistema-mlat-cada-vez-mas-cerca-de.html>  
<http://oa.upm.es/35037/>
- [52] [https://www.icao.int/SAM/Documents/2010/SURAUTOSEM/12%20ERA\\_MLAT%20Implementation.pdf](https://www.icao.int/SAM/Documents/2010/SURAUTOSEM/12%20ERA_MLAT%20Implementation.pdf)
- [53] <http://www.aerotendencias.com/aeropuertos/4999-el-aeropuerto-de-barcelona-estrena-un-sistema-de-control-por-multilateracion/>
- [54] [https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/mlat\\_concept.pdf](https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/mlat_concept.pdf)
- [55] <http://www.enaire.es/csee/ccurl/277/858/geographic-presence.pdf>
- [56] <http://www.multilateration.com/downloads/MLAT-ADS-B-Reference-Guide.pdf>
- [57] <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2015/10/perez-cruz.pdf>
- [58] Grenier, Emmanuel; Lalaurie, Eric. «Specifications Multilateration function iin ICS telecom». ATDI. 2008.
- [59] [http://www.era.cz/downloads/letters/reference\\_Spain\\_Madrid.pdf](http://www.era.cz/downloads/letters/reference_Spain_Madrid.pdf)
- [60] [https://www.icao.int/SAM/Documents/2010/SURAUTOSEM/12%20ERA\\_MLAT%20Implementation.pdf](https://www.icao.int/SAM/Documents/2010/SURAUTOSEM/12%20ERA_MLAT%20Implementation.pdf)
- [61] Yahya. K. «MLAT SIMULATION WITH ATDI TOOLS». 2016







